

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
9. Januar 2003 (09.01.2003)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
PCT WO 03/002933 A1

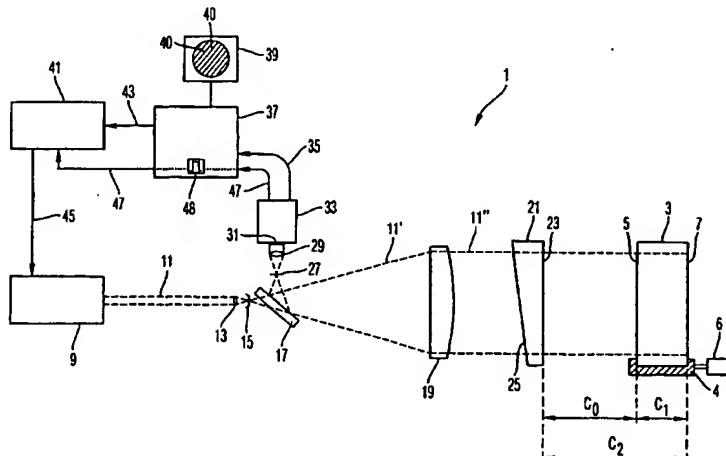
(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: G01B 9/02, (72) Erfinder; und  
11/24, 11/30 (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SCHULTE, Stefan  
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP02/07080 [DE/DE]; Schnaitbergstrasse 37, 73434 Aalen (DE).  
(22) Internationales Anmeldedatum: 26. Juni 2002 (26.06.2002) DÖRBAND, Bernd [DE/DE]; Sauerbachstrasse 103,  
73434 Aalen (DE). MÜLLER, Henriette [DE/DE]; Sauerbachstrasse 103, 73434 Aalen (DE). KÄHLER,  
Wolfgang [DE/DE]; Jahnstrasse 39, 73431 Aalen (DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch (74) Anwälte: DIEHL, Hermann, O., Th. usw.; Augustenstrasse 46, 80333 München (DE).  
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch (81) Bestimmungsstaaten (national): JP, US.  
(30) Angaben zur Priorität: 101 30 902.3 27. Juni 2001 (27.06.2001) DE (84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).  
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): CARL ZEISS SEMICONDUCTOR MANUFACTURING TECHNOLOGIES AG [DE/DE]; Carl-Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE).  
Veröffentlicht:  
— mit internationalem Recherchenbericht

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: INTERFEROMETER SYSTEM, METHOD FOR RECORDING AN INTERFEROGRAM AND METHOD FOR PROVIDING AND MANUFACTURING AN OBJECT WITH A SPECIFIED SURFACE

(54) Bezeichnung: INTERFEROMETERSYSTEM, VERFAHREN ZUM AUFNEHMEN EINES INTERFEROGRAMMS UND VERFAHREN ZUM BEREITSTELLEN UND HERSTELLEN EINES OBJEKTS MIT EINER SOLL-OBERFLÄCHE



WO 03/002933 A1

(57) Abstract: The invention relates to an interferometer system, comprising a reference surface, a mounting for an object which provides an object surface, a radiation source for emitting radiation of an adjustable frequency onto the reference and object surfaces, a positioning radiation detector and a control mechanism for adjusting a plurality of various frequencies of the radiation emitted by the radiation source. Said system also comprises an integrator for the location-dependent determination of the interference pattern which is superimposed on the radiation detector at various frequencies. The invention also relates to a method for recording an interferogram, a method for providing an object with a specified surface and a method for manufacturing the same.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

---

**(57) Zusammenfassung:** Es wird ein Interferometersystem vorgeschlagen umfassend eine Referenzfläche, eine Halterung für ein eine Objektfläche bereitstellendes Objekt, eine Strahlungsquelle zur Emission von Strahlung einer einstellbaren Frequenz auf die Referenzfläche und die Objektfläche, und einen ortsauflösenden Strahlungsdetektor sowie ferner eine Steuerung zum Einstellen einer Mehrzahl verschiedener Frequenzen der von der Strahlungsquelle emittierten Strahlung, und einen Integrator, um die bei verschiedenen Frequenzen auf dem Strahlungsdetektor überlagerten Interferenzmuster ortsabhängig zu mitteln. Weiters wird vorgeschlagen, ein Verfahren zum Aufnehmen eines Interferogramms, ein Verfahren zum Bereitstellen eines Objekts mit einer Soll-Oberfläche sowie ein Verfahren zum Herstellen eines Objekts mit einer Soll-Oberfläche.

Interferometersystem, Verfahren zum Aufnehmen  
eines Interferogramms und Verfahren zum Bereitstellen  
und Herstellen eines Objekts mit einer Soll-Oberfläche

---

5

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Interferometersystem und ein Verfahren zur Aufnahme eines Interferogramms. Das Interferometersystem und das Verfahren werden vorzugsweise 10 dazu eingesetzt, aus dem Interferogramm topologische Eigenschaften einer Objektfläche durch Auswerten des aufgenommenen Interferogramms zu ermitteln.

Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zum Bereitstellen 15 und Herstellen eines Objekts mit einer Soll-Oberfläche, wobei Abweichungen zwischen der Soll-Oberfläche und einer tatsächlichen Oberfläche des Objekts aus einem Interferogramm bestimmt werden und das Objekt in Abhängigkeit von diesen Abweichungen bereitgestellt bzw. nachbearbeitet wird.

20

Interferometersysteme werden herkömmlicherweise unter anderem zur Bestimmung von topologischen Eigenschaften einer Objektfläche eingesetzt. Es wird hierzu beispielsweise eine bekannte Referenzfläche und eine zu vermessende Objektfläche mit 25 kohärenter Strahlung beleuchtet, und ein von der Objektfläche zurückgeworfenes Objektwellenfeld und ein von der Referenzfläche zurückgeworfenes Referenzwellenfeld werden beispielsweise auf einem Schirm zur Überlagerung gebracht, so daß dort ein Interferenzmuster entsteht. Aus dem Interferenzmuster kann ortsabhängig ein Unterschied des optischen 30 Wegs von Referenzfläche zu Schirm und Objektfläche zu Schirm bestimmt werden, woraus dann topologische Unterschiede zwischen der Objektfläche und der Referenzfläche bestimmbar sind.

35

Es sind zwei Techniken gebräuchlich, um solche Wegdifferenzen mit einem Interferometersystem zu bestimmen:

5 Ein erster Ansatz ist die sogenannte Streifenmusterinterferometrie ("FPI", fringe pattern interferometry), bei der ein optischer Wegunterschied zwischen zwei Wellenfronten aus Positionen von Streifenzentren eines Interferenzmusters bestimmt wird. Es kann hier beispielsweise Bezug genommen werden auf R.A. Jones und P.L. Kadakia, "An Automated Interferogram Technique", Applied Optics, Vol. 7, pp. 1477-1482 (1968); Zanoni, U.S. Patent Nr. 4,159,522 veröff. 26. Juni 1979, und Zanoni, U.S. Patent Nr. 4,169,980, veröff. 2. Oktober 1979.

15 15 Der andere Ansatz ist die sogenannte Phasenmeßinterferometrie ("PMI", phase measuring interferometry), wo die Phasendifferenz zwischen den beiden Wellenfronten für jedes Pixel eines Detektors aus mehreren Interferenzmustern errechnet wird, wobei die mehreren Interferenzmuster aufgenommen werden, indem in diesen verschiedene Phasendifferenzen erzeugt werden. Es kann hierzu beispielsweise Bezug genommen werden auf J.H. Brunning et al., "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses", Applied Optics, Vol. 13, pp. 2693-2703 (1974); Gallagher et al., U.S. Patent Nr. 3,694,088 veröff. 26. September 1972, N. Balasubramanian, U.S. Patent Nr. 4,225,240 veröff. 30. September 1980; M. Schaham, Proceedings SPIE, Vol. 306, pp. 183-191 (1981); und H.Z. Hu, "Polarization heterodyne interferometry using a simple rotating analyzer. 1: Theory and error analysis", Applied Optics, Vol. 22, pp. 2052-2056 (1983).

35 Aus US 4,594,003 ist ein Interferometersystem bekannt, bei dem die Frequenz der Strahlungsquelle änderbar ist, so daß sich die Streifen des Interferenzmusters verlagern lassen, ohne daß eine optische Komponente des Interferometersystems,

wie etwa eine Referenzfläche oder eine Objektfläche, mechanisch verschoben werden muß. Hierbei ist eine Änderung über einen solchen Bereich vorgesehen, daß die Streifen des Interferenzmusters über eine volle Streifenbreite verlagerbar sind. Es werden vier Interferenzmuster aufgenommen, und zwar bei vier jeweils verschiedenen in diesem Bereich verteilten Frequenzen der Strahlungsquelle. Für jeden Pixel des Detektors wird dann eine Phase  $\varphi$  der optischen Wegdifferenz nach folgender Formel berechnet:

10.

$$\varphi(x,y) = \arctan \left( \frac{B(0) - B(2)}{B(1) - B(3)} \right),$$

wobei  $B(0)$  bis  $B(3)$  die Intensitäten der einzelnen Aufnahmen an dem entsprechenden Pixel sind.

15

Dieses bekannte Verfahren zum Bestimmen von Wegdifferenzen ist dann weniger geeignet, wenn in dem Interferometersystem eine weitere Fläche vorhanden ist, welche ebenfalls ein Wellenfeld zurückwirft, das mit den von der Referenzfläche und der Objektfläche zurückgeworfenen Wellenfeldern interferiert. Das entstehende Interferenzmuster ist dann von besonders komplexer Natur. Dieser Fall tritt beispielsweise auf, wenn eine Oberfläche einer transparenten Platte mit zwei im wesentlichen planparallelen Oberflächen vermessen werden soll.

20  
25  
30  
35

Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Interferometersystem und ein Verfahren zum Aufnehmen eines Interferogramms vorzuschlagen, welches weniger empfindlich auf Störreflexionen ist.

Ferner ist es eine Aufgabe der Erfindung ein Verfahren zum Bereitstellen und Herstellen eines Objekts mit einer Soll-Oberfläche anzugeben.

Die Erfindung geht hierbei von einem Interferometersystem aus, welches eine Referenzfläche, eine Objektfläche, eine Strahlungsquelle zum Beleuchten der Referenzfläche und der Objektfläche mit Strahlung einer einstellbaren Frequenz und 5 einen ortsauf lösenden Strahlungsdetektor umfaßt. Die Strahlungsquelle, die Referenzfläche, die Objektfläche und der Detektor sind derart angeordnet, daß sich ein von der Referenzfläche reflektiertes Referenzwellenfeld mit einem von der Objektfläche reflektierten Objektwellenfeld zu einem Interfe-10 renzmuster mit ortsabhängiger Intensitätsverteilung überlagert, welches auf den Detektor abgebildet ist. Hierbei ist das durch Überlagerung des Referenzwellenfelds und des Objektwellenfelds gebildete Interferenzmuster gestört durch ein mit diesen Wellenfeldern ebenfalls überlagertes Störwellen-15 feld, welches von einer Störinterferenz-Fläche zurückgeworfen wird, die gemeinsam mit der Referenzfläche bzw. der Objektfläche von der Strahlungsquelle beleuchtet ist.

Die Erfindung zeichnet sich hierbei durch einen Integrator 20 aus, um mehrere Interferenzmuster ortsabhängig zu mitteln, welche bei jeweils verschiedenen Frequenzen der von der Strahlungsquelle emittierten Strahlung aufgenommen sind.

Das erzeugte Interferogramm entsteht also derart, daß für 25 jeden Ort des Interferogramms ein Mittel gebildet wird aus den Intensitäten der einzelnen Interferenzmuster an diesem Ort. Die Mittelung ist hierbei vorzugsweise eine gewichtete Mittelung.

Werte der Gewichte für das gewichtete Mitteln oder/und Werte 30 der verschiedenen Strahlungsfrequenzen werden vorzugsweise in Abhängigkeit von dem Abstand der Störinterferenz-Fläche von der Objektfläche bzw. von der Referenzfläche eingestellt. Diese Werte werden hierbei vorzugsweise derart eingestellt, 35 daß sich ein Einfluß der Störwellenfront auf das Interferogramm weitgehend herausmittelt. Es hat dann das durch Mitte-

lung aus mehreren Interferenzmustern gebildete Interferogramm eine Gestalt bzw. Intensitätsverteilung, die in etwa der entspricht, wie sie die Wellenfronten der von der Objektfläche und der Referenzfläche zurückgeworfenen Wellenfronten 5 alleine erzeugen würden, wenn die Störinterferenz-Fläche in dem Interferometersystem nicht vorhanden wäre.

Hierbei ist es weiterhin vorteilhaft, die optische Wegdifferenz zwischen Referenzfläche und Objektfläche einstellbar zu 10 gestalten, da durch geeignete Wahl diese Abstände relativ zueinander ein Einfluß der Störwellenfront auf das Interferogramm weiter reduzierbar ist.

Vorteilhafterweise werden die mehreren Frequenzen zur Erzeugung 15 der mehreren Interferenzmuster zeitlich nacheinander während einer Zeitdauer eingestellt, die einem Belichtungszeitintervall einer Kamera entspricht, die die Interferenzmuster aufnimmt. Dies hat eine besonders einfache Ausbildung des Integrators zur Folge, da dieser durch die Kamera selbst 20 gebildet ist.

Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand von Zeichnungen näher erläutert. Hierbei zeigt:

25 Figur 1 eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Interferometersystems,

Figur 2 ein Diagramm zur Erläuterung von verschiedenen Frequenzen von von einer Strahlungsquelle der Figur 1 abgegebenen Strahlung zur Erzeugung von Interferenzmustern,

30 Figur 3 eine zeitliche Abhängigkeit der von der Strahlungsquelle der Figur 1 emittierten Strahlung,

5 Figur 4 ein Diagramm, welches eine Interferogramm-Intensität in Abhängigkeit von einer optischen Wegdifferenz für ein durch das Interferometersystem der Figur 1 erzeugtes Interferenzmuster bei Einstellung der Frequenzen gemäß den Figuren 2 und 3 ergibt,

10 Figur 5 eine Interferogramm-Modulation in Abhängigkeit von einer optischen Wegdifferenz in dem Interferometersystem der Figur 1, wie sie sich bei einer weiteren zeitabhängigen Einstellung der Frequenzen der Strahlungsquelle ergibt,

15 Figur 6 eine der Figur 2 entsprechende Frequenzverteilung der von der Strahlungsquelle emittierten Strahlung,

20 Figur 7 eine der Figur 4 entsprechende Darstellung der Interferogramm-Intensität in Abhängigkeit der optischen Weglängendifferenz bei Einsatz der in Figur 6 gezeigten Frequenzverteilung,

25 Figur 8 eine Teilansicht einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Interferometersystems und

Figur 9 eine Teilansicht noch einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Interferometersystems.

30 Figur 1 zeigt ein Fizeau-Interferometersystem 1 zur Vermessung einer Oberfläche 5 einer planparallelen Platte 3. Die Platte 3 ist in einer Halterung 4 gehalten, welche über einen motorischen Antrieb 6 relativ zu einer Referenzfläche 23 verlagerbar ist.

35 Das Interferometersystem 1 umfaßt eine Lichtquelle 9, die einen Strahl 11 kohärenten Lichts mit einstellbarer Wellen-

länge bzw. Frequenz emittiert. Die Lichtquelle 9 ist eine sogenannte ECDL-Quelle, ein Diodenlaser mit einstellbarer externer Kavität ("External Cavity Diode Laser").

5 Eine solche ECDL-Strahlungsquelle ist beispielsweise in dem Artikel "Widely Tunable External Cavity Diode Lasers" von Tim Day, Michael Brownell and I-Fan Wu beschrieben. Entsprechende Quellen können von der Firma New Focus, Inc., 1275 Reamwood Avenue, Sunnyvale, CA 94089, USA bezogen werden.

10 Der von der Quelle 9 emittierte Strahl 11 wird von einer Linse 13 auf eine rotierende Mattscheibe bzw. Streuscheibe 15 zur Unterdrückung räumlicher Kohärenz der Strahlung fokussiert. Die Streuscheibe 15 rotiert um eine in Figur 1 nicht 15 dargestellte Drehachse.

Nach Durchlaufen des Fokus im Bereich der Streuscheibe 15 durchsetzt der sich aufweitende Strahl 11' einen halbdurchlässigen Spiegel 17 und wird sodann nach ausreichender Aufweitung durch einen Kollimator 19, der ein oder mehrere Linsen umfassen kann, parallelisiert. Der daraufhin parallelisierte Strahl 11" durchläuft eine Glasplatte 21, deren von dem Kollimator 19 wegweisende Fläche 23 die Referenzfläche zur Vermessung der Oberfläche 5 der planparallelen Platte 3 bildet. Die Referenzfläche 23 ist möglichst plan gefertigt. Eine dem Kollimator 19 zuweisende Fläche 25 der Platte 21 erstreckt sich unter einem Winkel zur Referenzfläche 23, so daß von dieser Fläche 25 reflektierte Strahlung nicht in sich zurückgeworfen wird und zu Störinterferenzen beiträgt.

30 Von der Referenzfläche 23 in sich zurückreflektierte Strahlung wird durch den Kollimator 19 wieder kollimiert, trifft auf den halbdurchlässigen Spiegel 17 und wird von diesem nach Durchlaufen einer Blende 27 und eines Okulars 29 auf eine 35 strahlungsempfindliche Schicht 31 einer CCD-Kamera 33 abgebildet. Ein durch die Referenzfläche 23 hindurchtretender

Teil des Strahls 11 trifft auf die zu vermessende Fläche 5 der planparallelen Platte 3. Die zu vermessende Fläche 5 ist möglichst orthogonal zur Richtung des parallelen Strahls 11" ausgerichtet. Ein Teil der auf die zu vermessende Fläche 5 treffenden Strahlung wird wiederum in sich zurückreflektiert, durchläuft die Platte 21 erneut, wird ebenfalls von dem Kolimator 19 fokussiert und auf die strahlungsempfindliche Fläche 31 abgebildet. Die strahlungsempfindliche Schicht 31 der Kamera 33 bildet somit einen Schirm, auf dem die von der Referenzfläche 23 zurückgeworfene Strahlung mit der von der zu vermessenden Fläche 5 zurückgeworfenen Strahlung interferiert.

Ein Zweck der Interferometeranordnung 1 ist es, das durch die interferierende Überlagerung der von der Referenzfläche 23 zurückgeworfenen Strahlung und der von der zu vermessenden Fläche 5 zurückgeworfenen Strahlung erzeugte Interferenzmuster zu erfassen.

Wie vorangehend bereits angedeutet, ist die Platte 3 allerdings eine planparallele Platte, das heißt die zu vermessende Oberfläche 5 der Platte 3 und eine dieser gegenüberliegende andere Rückfläche 7 der Platte 3 erstrecken sich im wesentlichen parallel zueinander. Dies führt dazu, daß ein Teil der Strahlung 11, welcher die zu vermessende Fläche 5 durchsetzt, von der Rückfläche 7 der Platte 3 ebenfalls in sich selbst zurückgeworfen und auf die strahlungsempfindliche Schicht 31 abgebildet wird.

Somit interferiert auf der strahlungsempfindlichen Schicht 31 zum einen die von der Referenzfläche 23 zurückgeworfene Strahlung mit der von der zu vermessenden Fläche 5 zurückgeworfenen Strahlung, wobei hierzwischen eine optische Weglängendifferenz  $2 \cdot C_0$  besteht, es interferiert auf der strahlungsempfindlichen Schicht 31 zum anderen die von der Referenzfläche 23 reflektierte Strahlung mit der von der Rückflä-

che 7 der planparallelen Platte 3 reflektierten Strahlung, wobei hierzwischen eine optische Weglängendifferenz  $2 \cdot C_2$  besteht, und es interferiert dort weiter die von der zu vermessenden Fläche 5 der Platte 3 reflektierte Strahlung mit der von deren Rückfläche 7 reflektierten Strahlung, wobei hierzwischen eine optische Weglängendifferenz von  $2 \cdot C_1$  besteht. Das auf der strahlungsempfindlichen Schicht 31 entstehende Interferenzmuster ist somit sehr kompliziert und schwer auszuwerten.

10

Die Kamera 33 liefert die Daten, die eine Strahlungsintensitätsverteilung auf der strahlungsempfindlichen Fläche 31 repräsentieren, über eine Datenleitung 35 an einen Rechner 37. Der Rechner 37 wiederum erzeugt eine Darstellung des Interferenzmusters auf der strahlungsempfindlichen Schicht 31 auf einem Sichtgerät 39, wobei in Figur 1 lediglich schematisch ein Interferenzmuster mit mehreren symbolischen Streifen 40 angedeutet ist. Der Rechner 37 speichert die Daten ferner und führt weiterhin eine Auswertung der Interferenzmuster durch, um hieraus Niveaunterschiede zwischen der Referenzfläche 23 und der zu vermessenden Fläche 5 bzw. die Topologie der zu vermessenden Fläche 5 zu bestimmen.

Das Interferometersystem 1 umfaßt ferner eine Steuerung 41, die von dem Rechner 37 über eine Steuerleitung 43 mit Frequenzdaten versorgt und freigegeben wird und die sodann zum einen über eine Leitung 45 die Frequenz der von der Quelle 9 auszugebenden Strahlung 11 zeitabhängig einstellt und zwar in Abhängigkeit eines von der Kamera 33 erzeugten Triggersignals 48, das über eine Leitung 47 auch dem Rechner 37 zugeführt wird.

Nachfolgend wird ein Verfahren zum Betrieb des Interferometersystems 1 beschrieben, wobei für die Platte 3 eine Dicke von 74mm angenommen ist, so daß sich unter Berücksichtigung

des Brechungsindexes des Glases der Platte 3 eine optische Wegdifferenz  $2 \cdot C_1$  von 214,39mm ergibt.

Die Steuerung 41 stellt zunächst über die Leitung 45 die Frequenz der Strahlungsquelle 9 auf eine erste Frequenz mit einem Wert  $f - \Delta f$  ein und startet über die Leitung 47 die Integration der CCD-Kamera 33, so daß das Interferenzmuster, welches durch die von den drei Flächen 23, 5 und 7 reflektierten Wellenfronten bei Beleuchtung mit Strahlung der Frequenz  $f - \Delta f$  erzeugt wird, auf die strahlungsempfindliche Fläche 31 der Kamera 33 fällt und die entsprechende Strahlungsintensität dort integriert wird. Nach 3,75msec stellt die Steuerung 41 die Quelle 9 auf eine zweite höhere Frequenz  $f$  ein, so daß das bei dieser Frequenz erzeugte Interferenzmuster als zweites Interferenzmuster während der Integrationszeit der Kamera 33 auf die strahlungsempfindliche Schicht 31 fällt und die entsprechenden Strahlungsintensitäten dort zu den Intensitäten des ersten Interferenzmusters integriert werden. Nach weiteren 7,5msec stellt die Steuerung 41 die Frequenz der Strahlungsquelle 9 auf eine noch höhere dritte Frequenz mit dem Wert  $f + \Delta f$  ein, so daß auch das bei dieser dritten Frequenz erzeugte Interferenzmuster ebenfalls innerhalb der Integrationszeit der Kamera auf deren Lichtsammelfläche 31 fällt und die Intensitäten des dritten Interferenzmusters zu den Intensitäten des ersten und zweiten Interferenzmusters addiert werden. Die Beleuchtung mit der dritten Frequenz  $f + \Delta f$  dauert 3,75sec, und daraufhin veranlaßt die Steuerung 41 über die Leitung 47 ein Beenden der Integrationszeit der Kamera 33, und die Daten, die die gesamte während der Integrationszeit auf die Lichtsammelfläche 31 gefallene Lichtintensität ortsabhängig repräsentieren, werden über die Leitung 35 an den Rechner 37 ausgelesen.

Die vorangehend beschriebene Integrationszeit der Kamera von 15msec wurde in dem Ausführungsbeispiel gewählt, um bei der gegebenen Laserleistung ein Bild guter Qualität zu erhalten.

Je nach zur Verfügung stehender Laserenergie und anderen Randbedingungen können auch andere Integrationszeiten eingestellt werden.

5 Diese Daten repräsentieren damit die Summe aus drei verschiedenen Interferenzmustern, wobei das erste Interferenzmuster mit Strahlung der Frequenz  $f-\Delta f$  aufgenommen wurde, das zweite Interferenzmuster mit der Frequenz  $f$  aufgenommen wurde und das dritte Interferenzmuster mit der Frequenz  $f+\Delta f$  aufgenommen wurde. Bei der Integration der drei Interferenzmuster wird das mit der mittleren Frequenz  $f$  aufgenommene Interferenzmuster im Vergleich zu den bei den beiden anderen Frequenzen  $f-\Delta f$ ,  $f+\Delta f$  aufgenommenen Interferenzmustern mit doppelter Gewicht berücksichtigt.

10 15 Diese gewichtete Beleuchtung mit drei verschiedenen Frequenzen ist nochmals in den Figuren 2 und 3 erläuternd dargestellt. In Figur 2 ist die spektrale Leistungsdichte in willkürlichen Einheiten in Abhängigkeit von der Wellenzahl  $k$  der Strahlung der Quelle 9 dargestellt. Es ist ersichtlich, daß die Beleuchtung mit den drei verschiedenen Frequenzen mit den relativen Gewichten 0,5, 1 und 0,5 erfolgt. Diese spektrale Leistungsdichteverteilung kann als Formel wie folgt dargestellt werden:

20 25

$$F(k) = A \cdot \left[ \frac{1}{2} \delta(k - (k_0 - \Delta k)) + \delta(k - k_0) + \frac{1}{2} \delta(k - (k_0 + \Delta k)) \right]$$

Gleichung (1)

Hierbei ist

30

- $\delta$  die Dirac'sche Deltafunktion,
- $k$  die Wellenzahl  $\frac{2\pi}{\lambda}$ ,
- $k_0$  die Ausgangswellenzahl  $\frac{2\pi}{\lambda_0}$  und

$\Delta k$  die der Frequenzänderung  $\Delta f$  entsprechende Wellenzahländerung.

5 Im vorliegenden Fall wurde  $\lambda_0=632,8\text{nm}$  gewählt. Auf diesen Wert der Wellenlänge ist die Strahlungsquelle 9 einstellbar, und diese Einstellung hat den Vorteil, daß für das Interferometersystem abgesehen von der Strahlungsquelle ein Aufbau und Komponenten gewählt werden können, wie sie von mit herkömmlichen He-Ne-Lasern betriebenen Interferometern her bekannt 10 sind.

Es ergibt sich das Interferogramm als Fouriertransformierte der spektralen Leistungsdichte zu

$$15 \quad I(x) = \int_0^{\infty} F(k) \cdot \cos kx \cdot dx = A \cdot \frac{1}{2} \{ \cos(k_0 - \Delta k) \cdot x + \cos(k_0 + \Delta k) \cdot x \} + A \cdot \cos(k_0 x) \\ = A \cdot \cos k_0 x \cdot (1 + \cos \Delta k x)$$

Gleichung (2)

20 Es ergibt sich somit für das Interferogramm eine Schwebungs- wellenzahl von  $\Delta k$ . Ein Verlauf der Funktion  $I(x)$  ist für einen beliebigen Punkt in dem Interferogramm in Figur 4 schematisch dargestellt. Eine Einhüllende der gezeigten Kurven wird auch als Interferenzkontrast bzw. Modulation bezeichnet. 25 Es ergibt sich somit, daß die Modulation in Abhängigkeit von der Entfernung von der Referenzfläche periodisch zu- und abnimmt, wobei für bestimmte Entfernungen die Modulation auf Null zurückgeht.

30 Ein vorteilhafter Betrieb des Interferometersystems 1 ist dann gegeben, wenn die reflektierenden Flächen 23, 5, 7 relativ zueinander so angeordnet werden, daß die durch den Abstand zwischen der zu vermessenden Fläche 5 und der Rückfläche 7 erzeugte optische Wegdifferenz  $2 \cdot C_1$  in etwa mit dem ersten Minimum der Modulation zusammenfällt, die durch den Abstand zwischen Referenzfläche 23 und der Rückfläche 7 der

Platte 3 erzeugte Weglängendifferenz  $2 \cdot C_2$  in etwa mit dem zweiten Minimum der Modulation zusammenfällt und die durch den Abstand zwischen Referenzfläche 23 und zu vermessender Fläche 5 erzeugte Weglängendifferenz  $C_0$  in etwa mit dem zweiten Maximum der Modulation zusammenfällt. Hierzu wird zuerst die Frequenzänderung  $\Delta f$  bzw. Wellenzahländerung  $\Delta k$  wie folgt ermittelt:

Es wird zunächst  $1 + \cos \Delta k \cdot C_1 = 0$  gesetzt, woraus sich  $\Delta k \cdot C_1 = \pi$  ergibt. Da im vorliegenden Beispiel der Plattendicke  $C_1 = 214,139 \text{ mm}$  angenommen ist, ergibt sich  $\Delta k = 14,67 \text{ m}^{-1}$ . Sodann wird der Abstand der Platte 3 von der Referenzfläche 23 über den Antrieb 6 so eingestellt, daß sich  $\Delta k \cdot C_2 = 3\pi$  ergibt. Hierbei ist anzumerken, daß die zuletzt genannte Bedingung mit

lediglich vergleichsweise geringer Genauigkeit einzuhalten ist, da die Modulation gemäß Figur 4 quadratische Minima aufweist und diese somit vergleichsweise unempfindlich gegenüber Änderungen der optischen Wegdifferenz sind.

Bei der beschriebenen Einstellung von  $\Delta k$  und dem Abstand der Rückfläche 7 von der Referenzfläche 23 ergibt sich dann automatisch die optische Weglängendifferenz  $2 \cdot C_0$  so, daß sie in etwa mit dem zweiten Maximum der Modulation gemäß Figur 4 zusammenfällt.

Es werden somit die durch die Rückfläche 7 der Platte 3 hervorgerufenen Störinterferenzen durch die während der Integrationszeit der Kamera 33 durchgeführte gewichtete Mittelung wirksam herausgemittelt, so daß das durch Mittelung gewonnene Interferogramm, abgesehen von einem Gleichlichtanteil, lediglich ein Streifenmuster aufweist, wie es aus der Interferenz alleine der von der Referenzfläche 23 zurückgeworfenen Wellenfront mit der von der zu vermessenden Fläche 5 zurückgeworfenen Wellenfront entstehen würde. Dieses vergleichsweise einfache und ungestörte Interferenzmuster wird dann einem bekannten Auswerteverfahren für Streifenmuster unterworfen,

um daraus die Topologie der zu vermessenden Fläche 5 zu bestimmen.

Der Betrieb des Interferometersystems 1 ist nicht darauf beschränkt, die Frequenz der Strahlungsquelle 9 mit dem in Figur 3 gezeigten Zeitschema anzusteuern. Als Variante ist nachfolgend die Möglichkeit diskutiert, die Frequenz der Strahlungsquelle 9 mit einer sinusförmigen Zeitabhängigkeit zu ändern. Es sei hier zunächst für die Interferogrammintensität I angenommen:

$$I(x) = I_0 [1 + V \cdot \cos(k \cdot x - \Phi_0)],$$

Gleichung (3)

wobei

- k die Wellenzahl der Strahlung ist, die in dieser Formel näherungsweise als konstant angenommen werden kann,
- x die optische Weglängendifferenz,
- 20  $\Phi_0$  eine Interferogrammphase und
- v ein Interferenzkontrast

ist.

25 Aufgrund der sinusförmigen Änderung der Frequenz ergibt sich die Interferogrammphase dann zu

$$\Phi_0 = \Phi_0(t) = \Phi_0 + A \cdot \sin \omega t,$$

Gleichung (4)

30

wobei

- $\Phi_0'$  ein mittlerer Phasenwert,
- $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit der Phasenmodulation und
- 35 A eine Phasenmodulationsamplitude

ist. Eingesetzt in Gleichung (3) ergibt sich somit

$$I(x,t) = I_0 \left[ 1 + V \cdot \cos(k \cdot x - \Phi_0 - A \cdot \sin \omega t) \right].$$

Gleichung (5)

5

Die Modulationsperiode für die Frequenzänderung der Strahlung wird nun derart eingestellt, daß ein ganzzahliges Vielfaches hier von der Integrationszeit der Kamera 33 entspricht. Das zeitlich gemittelte Interferogramm berechnet sich somit zu

10

$$\begin{aligned} \bar{I}(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_0 \left[ 1 + V \cdot \cos(k \cdot x - \Phi_0 - A \cdot \sin \omega t) \right] \cdot d(\omega t) \\ &= I_0 + I_0 \cdot V \cdot \cos(k \cdot x - \Phi_0) \cdot \underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(A \cdot \sin \omega t) \cdot d(\omega t)}_{J_0(A)} \\ &\quad + I_0 \cdot V \cdot \sin(k \cdot x - \Phi_0) \cdot \underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(A \cdot \sin \omega t) \cdot d(\omega t)}_0 \end{aligned}$$

$$\bar{I}(x) = I_0 \left[ 1 + V \cdot \cos(k \cdot x - \Phi_0) \cdot J_0(A) \right]$$

Gleichung (6)

wobei  $J_0(A)$  die Besselfunktion 0-ter Ordnung der Phasenmodulationsamplitude A ist. Diese Funktion ist in Figur 5 dargestellt.

15

Es lassen sich nun Phasenmodulationsamplituden A finden, für die Interferenzen zwischen den von der zu vermessenden Fläche 5 und der Rückfläche 7 der Platte 3 zurückgeworfenen Wellenfronten verschwinden. Es muß die Frequenzmodulationsamplitude der Strahlungsquelle 9 somit so eingestellt werden, daß die Phasenmodulation für die optische Weglängendifferenz  $2 \cdot C_1$  der ersten Nullstelle der Besselfunktion aus Gleichung (6) entspricht. Dies ist der Fall für  $A_1 = 0,76547 \cdot \pi$ .

20

Durch Ändern des Abstands zwischen der Referenzfläche 23 und der Platte 3 wird dann weiter erreicht, daß die optische Weglängendifferenz  $2 \cdot C_2$  dem zweiten Minimum der Besselfunktion der Gleichung (6) entspricht, was für  $A_2=1,7571 \cdot \pi$  der Fall ist. Das Verhältnis der optischen Wegdifferenzen ist somit gegeben durch die beiden ersten Nullstellen der Besselfunktion  $J_0(A)$ :

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{A_2}{A_1} = 2,2955.$$

10

Gleichung (7)

Andererseits gilt  $C_0 = C_2 - C_1$ , und für die zu vermessende Weglängendifferenz  $C_0$  ergibt sich die Amplitude

$$15 \quad A_0 = \frac{C_0}{C_1} \cdot A_1 = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot A_1 = 0,9916 \cdot \pi.$$

Gleichung (8)

An dieser Stelle hat die Besselfunktion  $J_0(A)$  den Wert

$$20 \quad J_0(A_0) = -0,297 \approx -0,3.$$

Gleichung (9)

In dieser Anordnung interferieren drei Teilstrahlen mit in etwa gleicher Grundintensität, wobei jedoch in dem gewichtet 25 gemittelten bwz. integrierten Interferogramm nur die Streifenmuster von zwei interferierenden Teilstrahlen sichtbar sind. Die übrigen Interferenzen mitteln sich heraus, bilden allerdings einen den Kontrast reduzierenden Gleichlichtanteil. Der effektive Kontrast rechnet sich zu

30

$$\text{eff} = V \cdot J_0(A_0) = \frac{2}{3} \cdot |-0,3| = 0,2.$$

Gleichung (10)

5 Dieser Kontrast ist ausreichend um die Lage der Streifen 40 zu bestimmen und aus der Auswertung des Streifenmusters auf die Topologie der zu vermessenden Fläche 5 schließen zu können. Es sei jedoch angemerkt, daß die Einstellung der Strahlungsfrequenz nach dem in Figur 3 gezeigten Schema zu einem höheren effektiven Kontrast führt.

10 Es sei nun noch als weiteres Ausführungsbeispiel beispielhaft der Fall erläutert, daß die Strahlungsquelle 9 derart ange-15 steuert wird, daß sie eine in Figur 6 gezeigte gaußförmige spektrale Leistungsdichte

$$A(k) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma \cdot e^{-\frac{(k-k_0)^2 \cdot \sigma^2}{2}}$$

15 *Gleichung (11)*

15 emittiert, wobei

k die Wellenzahl  $\frac{2\pi}{\lambda}$ ,

k<sub>0</sub> die Schwerpunktwellenzahl  $\frac{2\pi}{\lambda_0}$  und

20 σ die Breite der Gaußfunktion

ist.

25 Für diese spektrale Verteilung ist nun eine zeitabhängige Ansteuerfunktion für die Strahlungsfrequenz zu bestimmen. Hierbei ist der Zusammenhang

$$\frac{dk(t)}{dt} = \frac{1}{A[k(t)]}$$

30 *Gleichung (12)*

zu beachten. Diese Gleichung kann durch den Rechner 37 numerisch gelöst werden, um schließlich ein der Figur 3 entspre-

chendes Zeitschema für die Ansteuerung der Strahlungsfrequenz zu erhalten.

Bei der spektralen Leistungsdichte gemäß Figur 6 ergibt sich 5 dann eine Abhängigkeit der Interferogrammintensität von der Weglängendifferenz, wie sie in Figur 7 dargestellt ist. Hier- aus ist ersichtlich, daß bei geringen Abständen von der Referenzfläche 23 hohe Interferenzkontraste erreichbar sind, während der Kontrast bei größeren Abständen der Referenz- 10 fläche 23 stark abfällt. Dieser Kontrastabfall ist so stark, daß bei Anordnung der Platte 3 dicht neben der Referenzfläche 23 durch die Rückseite 7 hervorgerufene Interferenzen sich weigehend herausmitteln und lediglich durch die zu vermessende Fläche 5 hervorgerufene Interferenzen zu dem 15 Streifenmuster des gemittelten Interferogramms beitragen.

Dies entspricht einem Interferogramm mit einer Strahlung zeitlich konstanter Frequenz und einer reduzierten Kohärenz- 20 länge, die kürzer ist als die optische Dicke  $C_1$  der Platte 3. Die zeitabhängige Frequenzänderung einer Strahlungsquelle großer Kohärenzlänge hat somit eine Wirkung, die einer Reduzierung der zeitlichen Kohärenz für bestimmte Längen entspricht. Unter Bezugnahme auf Figur 4 bedeutet dies, daß die 25 zeitabhängige Frequenzänderung dazu geführt hat, daß in den Bereichen der Modulationsminima die Kohärenz der Strahlung zerstört wurde.

Nachfolgend werden weitere Varianten der in den Figuren 1 bis 7 erläuterten Ausführungsformen dargestellt. Hinsichtlich 30 ihres Aufbaus und ihrer Funktion einander entsprechende Komponenten sind mit den Bezugszahlen aus den Figuren 1 bis 7 bezeichnet, zur Unterscheidung jedoch mit einem zusätzlichen Buchstaben versehen. Zur Erläuterung wird auf die gesamte vorangehende Beschreibung jeweils Bezug genommen.

Figur 8 zeigt eine Teilansicht eines Interferometersystems 1a, welches ähnlich aufgebaut ist wie das in Figur 1 gezeigte Interferometersystem. Allerdings dient das Interferometer-  
5 system 1a nicht zur Vermessung einer planparallelen Platte sondern einer konzentrischen Meniskuslinse 3a. Im Strahlen-  
gang nach einer Referenzplatte 21a mit einer Referenzfläche 23a ist ein Aplanar-Kollimator 51 mit einer Mehrzahl Linsen 52 bis 56 vorgesehen, welcher die parallele Strahlung 11'a in einem Punkt 57 fokussiert, der gleichzeitig Krümmungsmittel-  
10 punkt von Oberflächen 5a und 7a der konzentrischen Meniskus-  
linse 3a ist.

Das Interferometersystem 1a entspricht ansonsten dem in Figur 1 gezeigten Interferometersystem und wird nach einem Verfah-  
15 ren betrieben, wie es im Zusammenhang mit dem Interferometer-  
system der Figur 1 erläutert wurde. Dies heißt, es wird die Frequenz der Strahlungsquelle zeitabhängig so angesteuert, daß Störinterferenzen, die durch eine gerade nicht vermessene Oberfläche, insbesondere die Fläche 7a, der konzentrischen  
20 Meniskuslinse 3a oder aber durch andere optisch wirksame Komponenten im Strahlengang hervorgerufen werden, sich zeit-  
lich weitgehend herausmitteln.

Es können die Flächen 5a und 7a der Meniskuslinse 3a auch  
25 vermessen werden, indem die Linse umgekehrt, das heißt mit ihrer konvexen Fläche 7a zu dem Kollimator 51 hinweisend, und vor dem Fokuspunkt 57 im Strahlengang positioniert wird.

Figur 9 zeigt eine Variante des in Figur 8 gezeigten Inter-  
30 ferometersystems. Im Unterschied hierzu ist bei dem Inter-  
ferometersystem 1b gemäß Figur 9 eine Referenzfläche 23a jedoch nicht an einer separaten Referenzplatte sondern an einer präzise gefertigten, dem Prüfling zugewandten Fläche der Linse 56b eines Aplanar-Kollimators 51 vorgesehen. Auch  
35 das Interferometersystem 1b dient zur Vermessung einer kon-  
zentrischen Meniskuslinse.

Neben den vorangehend beschriebenen Zeitabhängigkeiten der Frequenz der Strahlungsquelle zur Erzeugung des Interferogramms können auch andere Zeitabhängigkeiten gewählt werden,  
5 welche sich als günstig erweisen. Wesentlich ist hierbei, daß sich Interferenzeffekte, die von Oberflächen hervorgerufen werden, die nicht vermessen werden sollen, sich zeitlich wenigstens teilweise herausmitteln.

10 Das Interferometersystem wurde vorangehend als ein Fizeau-Interferometer beschrieben. Es ist jedoch auch möglich, alternative Interferometertypen einzusetzen, etwa einen Michelson-Interferometeraufbau oder einen Twyman-Green-Interferometeraufbau.

15 In den vorangehend beschriebenen Ausführungsbeispielen wurde als Integrator zur gewichteten Mittelung der bei verschiedenen Beleuchtungsfrequenzen erzeugten Interferenzmuster die CCD-Kamera eingesetzt. Es ist jedoch auch möglich, andere  
20 Kameratypen einzusetzen, welche eine Integrationszeit aufweisen, auf die die Sequenz der zeitlich nacheinander eingestellten Beleuchtungsfrequenzen abgestimmt ist. Ferner ist es möglich, für mehrere Beleuchtungsfrequenzen separate Kamerabilder zu erzeugen, diese dem Rechner zuzuführen und die  
25 Integration bzw. gewichtete Mittelung im Rechner Pixel für Pixel durchzuführen. Als Pixel sei im Rahmen dieser Anmeldung eine Auflösungseinheit des digitalisierten Interferenzbildes verstanden, welche unter anderem durch das Kamerasytem gegeben ist. Die Mittelung im Rechner kann hierbei auch für Gruppen von Pixeln, das heißt mit einer Auflösung, die geringer ist als die Kameraauflösung, durchgeführt werden.  
30

35 Das vorangehend beschriebene Interferometersystem und das Verfahren zum Aufnehmen des Interferogramms wird vorteilhafterweise eingesetzt in einem Verfahren zur Bereitstellung

eines Objekts bzw. in einem Verfahren zum Herstellen eines Objekts mit einer vorbestimmten Soll-Oberfläche.

Soll beispielsweise die im Zusammenhang mit Figur 1 erläuterte planparallele Platte hochpräzise gefertigt werden, so wird diese im Strahlengang des Interferometersystems plaziert und ein Interferogramm nach dem vorangehend beschriebenen Verfahren aufgenommen. Aus dem Interferogramm werden Abweichungen der Fläche 5 von der planen Soll-Gestalt ermittelt.

Aus diesen Abweichungen wird eine Nachbearbeitung geplant. Insbesondere werden aus diesen Abweichungen Orte auf der Oberfläche 5 bestimmt, an denen eine Nachbearbeitung, insbesondere durch weiteren Materialabtrag, erfolgen soll. Nach Vornahme der Nachbearbeitung wird gegebenenfalls erneut ein Interferogramm aufgenommen und gegebenenfalls werden weitere Nachbearbeitungen vorgenommen. Ergibt sich aus dem aufgenommenen Interferogramm, daß Abweichungen zwischen der Gestalt der Oberfläche 5 und der planen Soll-Gestalt geringer als ein vorbestimmtes Maß sind, so wird die Platte bereitgestellt bzw. ausgeliefert.

Dieses Bereitstellungs- bzw. Herstellungsverfahren kann auf jegliches anderes Objekt angewendet werden, welches eine vorbestimmte Oberfläche aufweisen soll. Vorangehend wurde bereits die Anwendung auf eine konzentrische Meniskuslinse erläutert. Es sind jedoch auch Anwendungen auf jegliche anderen Objekte denkbar.

## Patentansprüche

1. Interferometersystem, umfassend:
  - eine Referenzfläche (23),
  - eine Halterung für ein eine Objektfläche (5) bereitstellendes Objekt (7),
  - eine Strahlungsquelle (9) zur Emission von Strahlung einer einstellbaren Frequenz auf die Referenzfläche (23) und die Objektfläche (5), und
  - einen ortsauflösenden Strahlungsdetektor (31),

5 wobei die Strahlungsquelle (9), die Referenzfläche (23), die Halterung und der Strahlungsdetektor (31) derart angeordnet sind, daß sich ein von der Referenzfläche (23) reflektiertes Referenzwellenfeld mit einem von Objektfläche (5) reflektierten Objektwellenfeld zu einem auf den Strahlungsdetektor (31) abgebildeten Interferenzmuster mit ortsabhängiger Intensitätsverteilung überlagern,

10 20 wobei eine Störinterferenz-Fläche (7) vorgesehen ist, die gemeinsam mit der Referenzfläche (23) oder/und der Objektfläche (5) von der Strahlungsquelle (9) bestrahlt ist, und

15 25 wobei das Interferometersystem ferner eine Steuerung (37, 41) zum Einstellen einer Mehrzahl verschiedener Frequenzen ( $f$ ,  $f+\Delta f$ ,  $f-\Delta f$ ) der von der Strahlungsquelle (9) emittierten Strahlung umfaßt, gekennzeichnet durch einen Integrator (33), um die bei verschiedenen Frequenzen auf dem Strahlungsdetektor (31) überlagerten Interferenzmuster ortsabhängig zu mitteln.

2. Interferometersystem nach Anspruch 1, wobei der Strahlungsdetektor (31) durch eine CCD-Kamera (33) bereitgestellt ist.

3. Interferometersystem nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Integrator durch den Strahlungsdetektor (31) gebildet ist.

5

4. Interferometersystem nach Anspruch 3, wobei die Steuerung (41, 37) mehrere, insbesondere sämtliche, der verschiedenen Frequenzen zeitlich nacheinander während einer Zeitdauer einstellt, die einer Integrationszeit des Detektors (33) entspricht.

10

5. Verfahren zum Aufnehmen eines Interferogramms, umfassend:

15

Beleuchten einer Referenzfläche (23) und einer Objektfläche (5) mit kohärenter Strahlung vorbestimmter Frequenz,

20

Überlagern eines von der Referenzfläche (23) reflektierten Referenzwellenfeldes und eines von der Objektfläche (5) reflektierten Objektwellenfeldes derart, daß auf einem Schirm (31) ein Interferenzmuster mit ortsabhängiger Strahlungsintensitätsverteilung entsteht,

25

wobei das Beleuchten nacheinander mit einer Mehrzahl verschiedener Strahlungsfrequenzen ( $f$ ,  $f+\Delta f$ ,  $f-\Delta f$ ) erfolgt, so daß auf dem Schirm nacheinander den verschiedenen Strahlungsfrequenzen jeweils zugeordnete Interferenzmuster entstehen, und.

30

wobei das Interferogramm dadurch gebildet wird, daß für einen jeden Ort des Interferogramms Intensitäten der Mehrzahl Interferenzmuster an dem entsprechenden Ort gewichtet gemittelt werden.

35

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die Gewichte für das gewichtete Mitteln durch Einstellen von Zeitdauern der Beleuchtungen mit den jeweils verschiedenen Strahlungsfrequenzen eingestellt werden.

5

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei mit Abstand von der Objektfläche (5) oder/und mit Abstand ( $C_2$ ) von der Referenzfläche (23) eine Störinterferenz-Fläche (7) angeordnet ist, die gemeinsam mit der Objektfläche (5) bzw. der Referenzfläche (23) beleuchtet wird, und wobei Werte der verschiedenen Strahlungsfrequenzen oder/und Werte der Gewichte für das gewichtete Mitteln in Abhängigkeit von dem Abstand eingestellt werden.

10

15 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, wobei zwischen einem optischen Weg von der Referenzfläche (23) zu dem Detektor (31) und einem optischen Weg von der Objektoberfläche (5) zu dem Detektor (31) eine erste Weglängendifferenz ( $C_0$ ) besteht, wobei zwischen einem optischen Weg von der Referenzfläche (23) zu dem Detektor (31) und einem optischen Weg von der Störinterferenz-Fläche (7) zu dem Detektor (31) eine zweite Weglängendifferenz ( $C_2$ ) besteht, wobei eine dritte Differenz ( $C_1$ ) zwischen der ersten und der zweiten Weglängendifferenz besteht, wobei das Beleuchten mit drei verschiedenen Strahlungsfrequenzen erfolgt, nämlich einer mittleren Frequenz ( $f$ ), einer höheren Frequenz ( $f+\Delta f$ ) und einer niedrigeren Frequenz ( $f-\Delta f$ ), wobei die drei Frequenzen paarweise voneinander einen Frequenzabstand ( $\Delta f$ ) aufweisen, wobei der Frequenzabstand ( $\Delta f$ ) derart eingestellt wird, daß die Gleichung

$$\Delta k \cdot C_1 = \pi$$

30 35 erfüllt ist, wobei  $\Delta k$  die dem Frequenzabstand ( $\Delta f$ ) entsprechende Wellenzahländerung ist,

wobei der Abstand zwischen der Störinterferenz-Fläche und dem Detektor derart eingestellt wird, daß die Gleichung

$$\Delta k \cdot C_2 = 3\pi$$

erfüllt ist, und wobei bei der Wichtung das der niedrigen Frequenz zugeordnete Interferenzmuster und das der höheren Frequenz zugeordnete Interferenzmuster einem jeweils einfachen Gewicht und das der mittleren Frequenz zugeordnete Interferenzmuster mit einem doppelten Gewicht berücksichtigt werden.

9. Verfahren zum Bereitstellen eines Objekts (3) mit einer Soll-Oberfläche, umfassend die Schritte:
  - Aufnehmen eines Interferogramms mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, wobei das Objekt (3) die Objektfläche (5) bereitstellt,
  - Auswerten des Interferogramms und Bestimmen von Abweichungen zwischen der Objektfläche und der Soll-Oberfläche in Abhängigkeit von dem Interferogramm,
  - Bereitstellen des Objekts, wenn die Abweichungen kleiner sind als ein vorbestimmter Schwellenwert und
  - Nicht-Bereitstellen des Objekts, wenn die Abweichungen größer sind, als der vorbestimmte Schwellenwert.
- 25 10. Verfahren zum Herstellen eines Objekts mit einer Soll-Oberfläche, umfassend die Schritte:
  - Aufnehmen eines Interferogramms mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, wobei das Objekt die Objektfläche bereitstellt,
  - Auswerten des Interferogramms und Bestimmen von Abweichungen zwischen der Objektfläche und der Soll-Oberfläche in Abhängigkeit von dem Interferogramm,
  - Abtragen von Oberflächenbereichen des Objekts an Orten, welche in Abhängigkeit von den Abweichungen zwischen Objektoberfläche und Soll-Oberfläche be-

stimmt werden, um die Objektoberfläche des Körpers der Soll-Oberfläche anzupassen.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, wobei der herzustellende Körper eine transparente planparallele Platte oder eine konzentrische Meniskuslinse ist.

5

1/5

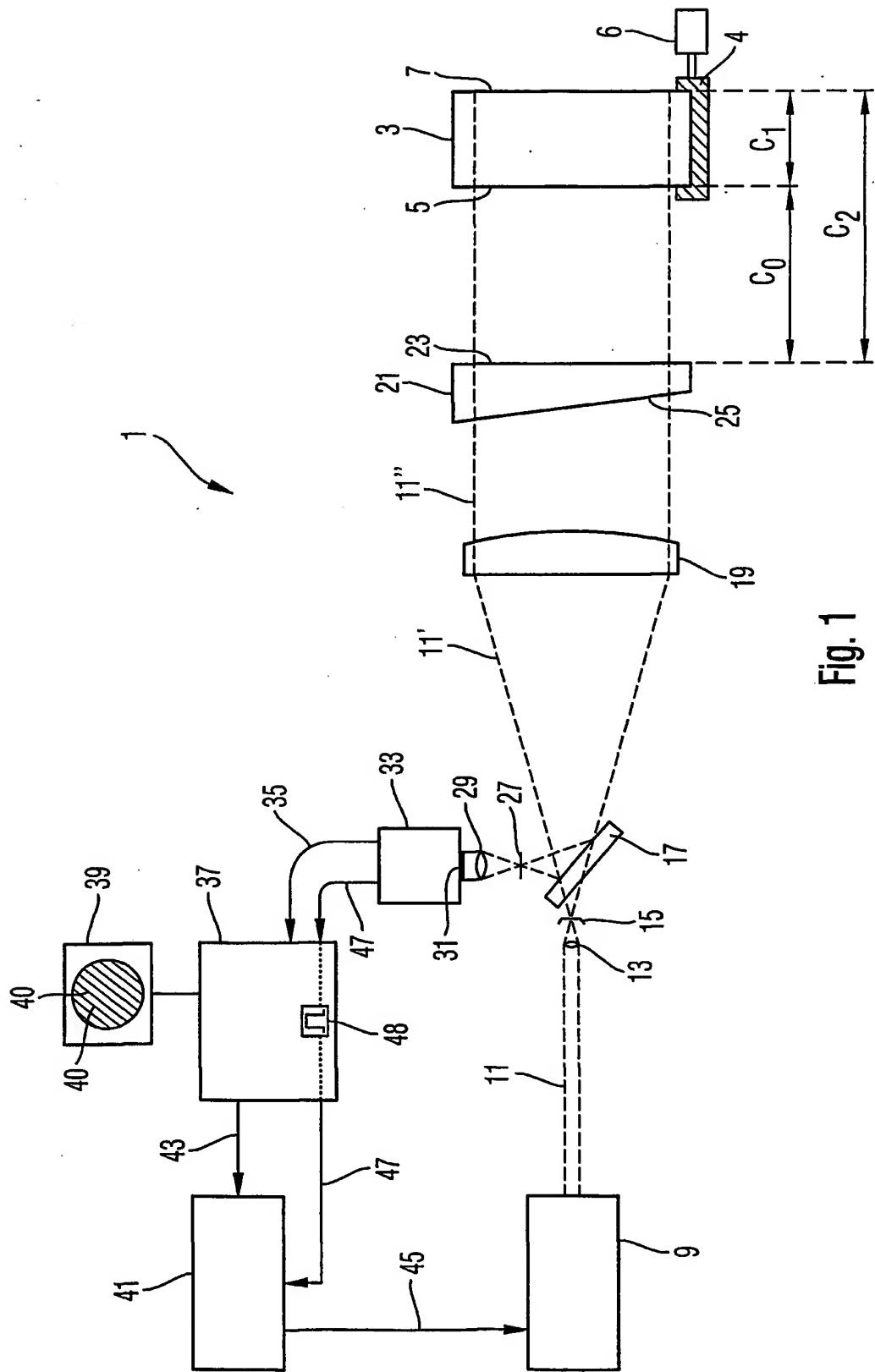


Fig. 1

2/5

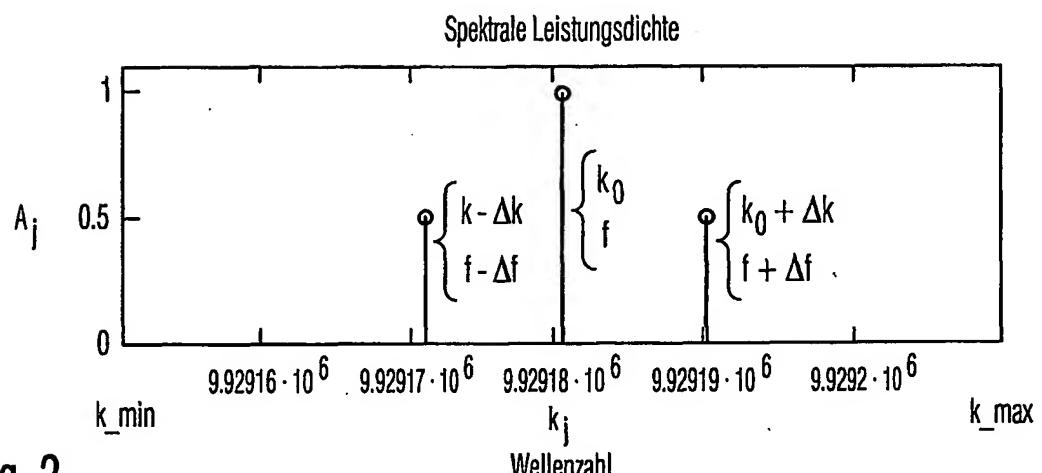


Fig. 2

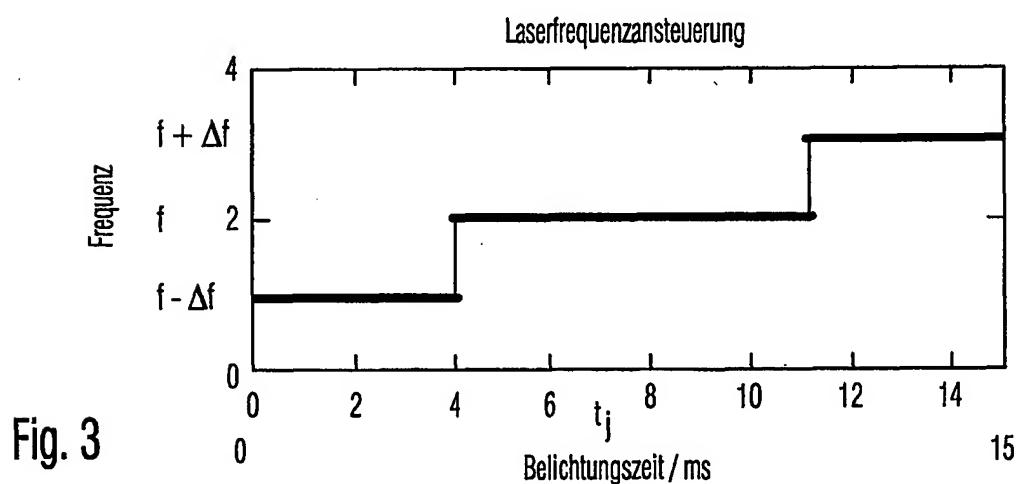


Fig. 3

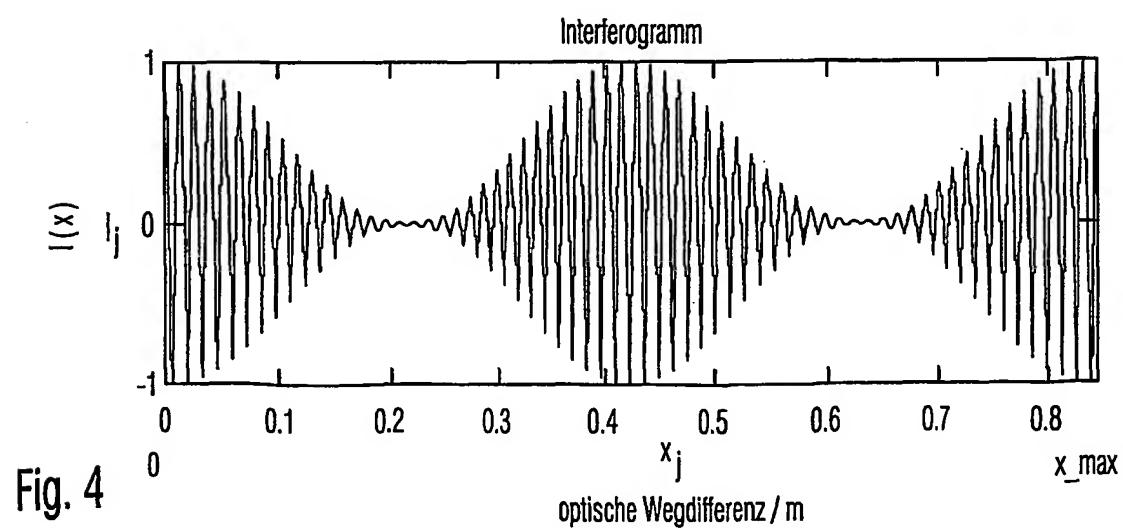
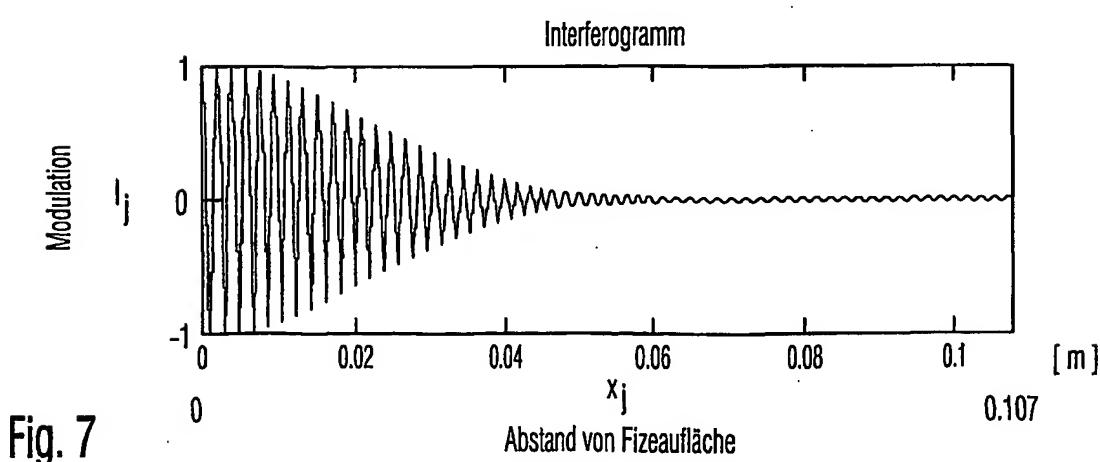
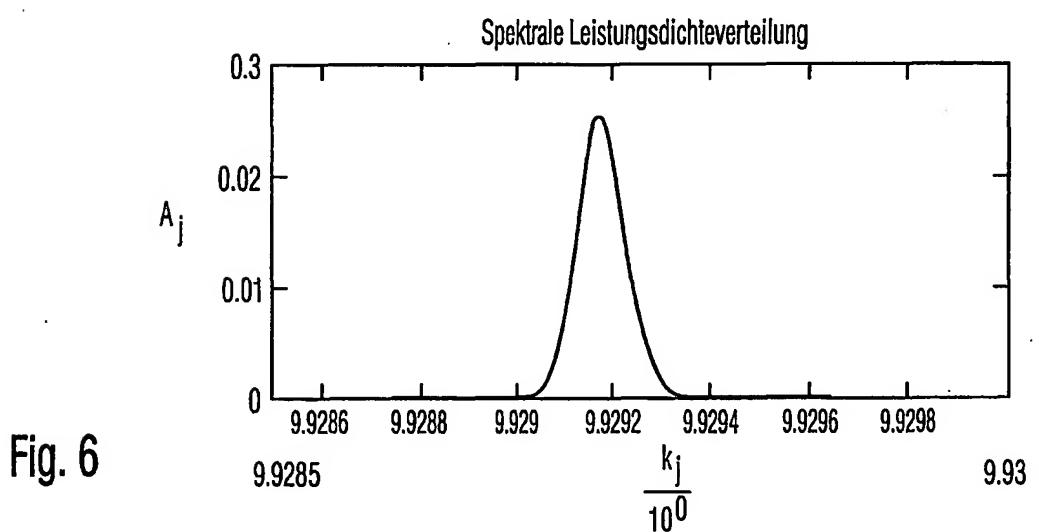
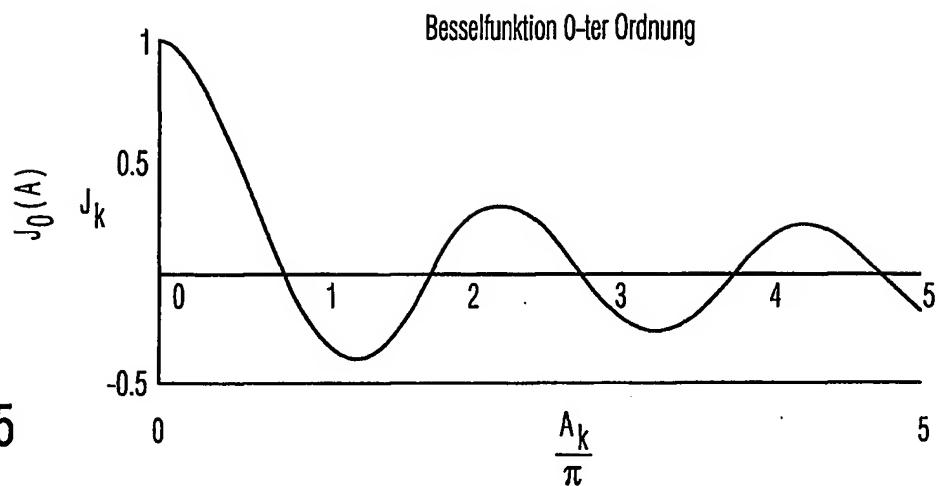


Fig. 4

3/5



4/5

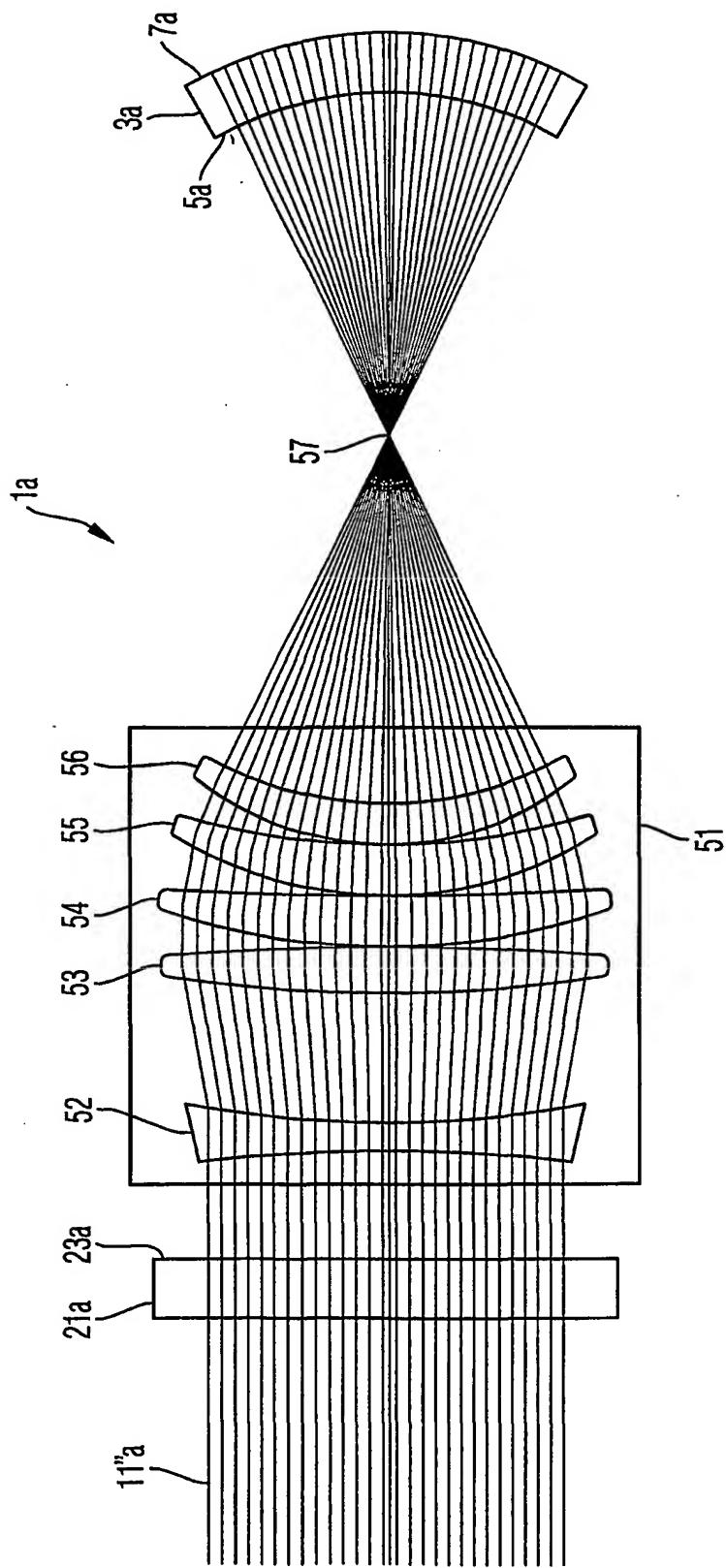


Fig. 8

5/5

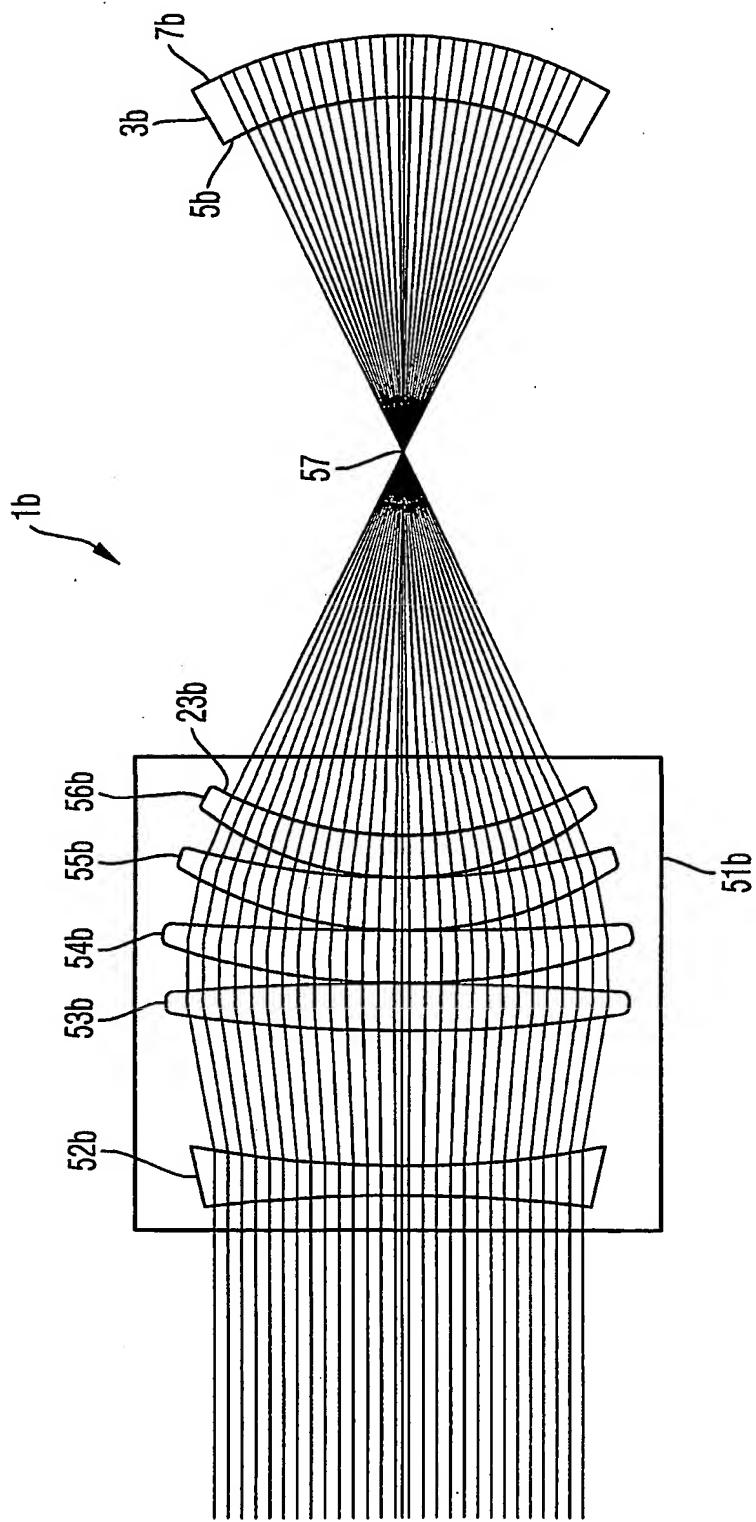


Fig. 9

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/EP 02/07080

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
IPC 7 G01B9/02 G01B11/24 G01B11/30

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
IPC 7 G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 488 477 A (DE GROOT PETER) 30 January 1996 (1996-01-30) abstract; figures 1,2,4 column 3 -column 4 column 9 -column 10	1-3,5,7, 9-11
A	---	8
A	US 5 598 265 A (DE GROOT PETER) 28 January 1997 (1997-01-28) abstract; figure 1 column 1, line 23 - line 45	9-11
A	US 5 452 088 A (AI CHIAYU) 19 September 1995 (1995-09-19) column 4 -column 6; figures 6-8 ---	1,5
	-/-	

Further documents are listed in the continuation of box C.

Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the International filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the International filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the International filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*&\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the International search

23 September 2002

Date of mailing of the International search report

01/10/2002

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3018

Authorized officer

Vorropoulos, G

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Int'l	ional Application No
PCT/EP 02/07080	

**C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4 594 003 A (SOMMARGREN GARY E) 10 June 1986 (1986-06-10) abstract; figure 1 -----	1,8

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP 02/07080

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)		Publication date
US 5488477	A	30-01-1996	NONE		
US 5598265	A	28-01-1997	CN	1147627 A ,B	16-04-1997
			DE	19613677 A1	10-10-1996
			FR	2732763 A1	11-10-1996
			JP	8285561 A	01-11-1996
US 5452088	A	19-09-1995	NONE		
US 4594003	A	10-06-1986	EP	0144510 A1	19-06-1985
			JP	1971872 C	27-09-1995
			JP	6056330 B	27-07-1994
			JP	60039518 A	01-03-1985

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen  
PCT/EP 02/07080

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
IPK 7 G01B9/02 G01B11/24 G01B11/30

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBiete

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
IPK 7 G01B

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 5 488 477 A (DE GROOT PETER) 30. Januar 1996 (1996-01-30) Zusammenfassung; Abbildungen 1,2,4 Spalte 3 -Spalte 4 Spalte 9 -Spalte 10	1-3,5,7, 9-11
A	—	8
A	US 5 598 265 A (DE GROOT PETER) 28. Januar 1997 (1997-01-28) Zusammenfassung; Abbildung 1 Spalte 1, Zeile 23 - Zeile 45	9-11
A	US 5 452 088 A (AI CHIAYU) 19. September 1995 (1995-09-19) Spalte 4 -Spalte 6; Abbildungen 6-8 —	1,5
	—/—	

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

Siehe Anhang Patentfamilie

- \* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
- \*'A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- \*'E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem Internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- \*'L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- \*'O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- \*'P\* Veröffentlichung, die vor dem Internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- \*'T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem Internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- \*'X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- \*'Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann nahelegend ist
- \*'&\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der Internationalen Recherche	Absendedatum des Internationalen Recherchenberichts
23. September 2002	01/10/2002
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Vorropoulos, G

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Ir ionales Aktenzeichen

PCT/EP 02/07080

## C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 4 594 003 A (SOMMARGREN GARY E) 10. Juni 1986 (1986-06-10) Zusammenfassung; Abbildung 1 -----	1,8

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen  
PCT/EP 02/07080

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 5488477	A	30-01-1996	KEINE		
US 5598265	A	28-01-1997	CN 1147627 A ,B DE 19613677 A1 FR 2732763 A1 JP 8285561 A	16-04-1997 10-10-1996 11-10-1996 01-11-1996	
US 5452088	A	19-09-1995	KEINE		
US 4594003	A	10-06-1986	EP 0144510 A1 JP 1971872 C JP 6056330 B JP 60039518 A	19-06-1985 27-09-1995 27-07-1994 01-03-1985	

## Appendix A

### Translation of WO 03/002933 PCT/EP02/07080

5

#### Interferometer system, method for recording an interferogram and method for providing and manufacturing an object having a target surface

---

10

The present invention relates to an interferometer system and a method for recording an interferogram. The interferometer system and the method are preferably used to determine topological properties of an object surface from the interferogram by evaluating the recorded 15 interferogram.

Furthermore, the invention relates to a method for providing and manufacturing an object having a target surface, wherein deviations between the target surface and an actual surface of the object are 20 determined from an interferogram and wherein the object is provided or reworked dependent upon such deviations.

Usually, interferometer systems are used, among others, to determine topological properties of an object surface. To this end, for example, 25 a known reference surface and an object surface to be measured are illuminated with coherent radiation, and an object wave field reflected from the object surface and a reference wave field reflected from the reference surface are superimposed on e.g. a screen such that an interference pattern is generated thereon. From the interference 30 pattern a difference between the optical paths from the reference surface to the screen and from the object surface to the screen may be determined position-dependently. From such differences topological differences between the object surface and the reference surface may then be determined.

35

Two techniques are commonly applied to determine such path differences with an interferometer system:

A first approach is the so-called fringe pattern interferometry "FPI", wherein an optical path difference between two wavefronts is determined from positions of fringe centers of an interference pattern. In this respect, reference can be made, for example, to R.A. Jones and

5 P.L. Kadakia, "An Automated Interferogram Technique", Applied Optics, vol. 7, pp. 1477-1482 (1968); Zanoni, U.S. patent no. 4,159,522, published June 26, 1979 and Zanoni, U.S. patent no. 4,169,980, published October 2, 1979.

10 Another approach is the so-called phase measuring interferometry "PMI", wherein the phase difference between the two wavefronts is calculated for each pixel of a detector from a plurality of interference patterns, said plurality of interference patterns being recorded in that different phase differences are generated therein. In this respect,

15 reference can be made, for example, to J.H. Brunning et al., "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses", Applied Optics, vol. 13, pp. 2693-2703 (1974); Gallagher et al., U.S. patent no. 3,694,088, published September 26, 1972, N. Balasubramanian, U.S. patent no. 4,225,240, published September 30,

20 1980; M. Schaham, Proceedings SPIE, vol. 306, pp. 183-191 (1981); and H.Z. Hu, "Polarization heterodyne interferometry using a simple rotating analyzer. 1: Theory and error analysis", Applied Optics, vol. 22, pp. 2052-2056 (1983).

25 From US patent 4,594,003 there is known an interferometer system in which the frequency of the radiation source is variable so that the fringes of the interference pattern can be displaced without an optical component of the interferometer system, such as a reference surface or an object surface, having to be mechanically shifted. In said system,

30 it is provided for a change over such a range that the fringes of the interference pattern are displaceable over a full fringe width. Four interference patterns are recorded, namely with four different frequencies of the radiation source distributed within said range. For each pixel of the detector a phase  $\phi$  of the optical path difference is

35 then calculated according to the following formula:

$$\varphi(x,y) = \arctan \frac{B(0) - B(2)}{B(1) - B(3)},$$

wherein B(0) to B(3) are the intensities of the individual images at the respective pixel.

5

This known method for determining path differences is less suitable if there is a further surface present in the interferometer system which likewise reflects a wave field which interferes with the wave fields reflected by the reference surface and the object surface. The 10 resulting interference pattern is then of a particular complex nature. This situation occurs, for example, if a surface of a transparent plate with two substantially plane-parallel surfaces is to be measured.

It is an object of the present invention to provide an interferometer 15 system and a method for recording an interferogram which is less sensitive to disturbing reflections.

Moreover, it is an object of the invention to provide a method for providing and manufacturing an object with a target surface.

20

In this respect, the invention proceeds from an interferometer system comprising a reference surface, an object surface, a radiation source for illuminating the reference surface and the object surface with radiation of an adjustable frequency and a position-sensitive radiation 25 detector. The radiation source, the reference surface, the object surface and the detector are disposed such that a reference wave field reflected from the reference surface is superimposed with an object wave field reflected from the object surface to form an interference pattern with a position-dependent intensity distribution, said 30 interference pattern being imaged onto the detector. Here, the interference pattern formed by superposition of the reference wave field and the object wave field is disturbed by a disturbing wave field which is likewise superimposed on said wave fields, said disturbing wave field being reflected from a disturbing interference surface which

is illuminated by the radiation source together with the reference surface and the object surface, respectively.

5 The invention is distinguished in this respect by an integrator for position-dependent averaging of a plurality of interference patterns which are recorded at different frequencies of the radiation emitted by the radiation source.

10 The resulting interferogram is thus generated such that for each position of the interferogram an average is formed from the intensities of the individual interference patterns at said position. Herein, the averaging is preferably a weighted averaging.

15 The weighting factors for the weighted averaging or/and the values of the different radiation frequencies are preferably set as a function of the distance of the disturbing interference surface from the object surface and the reference surface, respectively. Preferably, these values are set such that an influence of the disturbing wavefront on the interferogram is substantially averaged out. The interferogram 20 formed by averaging a plurality of interference patterns is then of such a configuration and intensity distribution, respectively, which corresponds approximately to that which would be generated by the wavefronts reflected from the object surface and the reference surface alone as if the disturbing interference surface were not present in the 25 interferometer system.

In this respect, it is further advantageous for the optical path difference between the reference surface and the object surface to be adjustable, since by appropriately selecting these distances relative 30 to each other, an influence of the disturbing wavefront on the interferogram can be further reduced.

It is advantageous for the plurality of frequencies for producing the plurality of interference patterns to be adjusted successively in time 35 over a period of time which corresponds to an exposure time interval of a camera which records the interference patterns. This enables a

particular simple design of the integrator since it is then formed by the camera itself.

Embodiments of the invention will be illustrated with reference to 5 drawings below, wherein

Figure 1 is an embodiment of an interferometer system according to the invention,

10 Figure 2 is a diagram illustrating differing frequencies of radiation emitted by a radiation source of figure 1 for generating interference patterns,

15 Figure 3 shows a time dependency of the radiation emitted from the radiation source of figure 1,

20 Figure 4 is a diagram showing an interferogram intensity as a function of an optical path difference for an interference pattern generated by the interferometer system of figure 1 when the frequencies are set in accordance with figures 2 and 3,

25 Figure 5 shows an interferogram modulation as a function of an optical path difference in the interferometer system of figure 1 which results from another time-dependent setting of the frequencies of the radiation source,

Figure 6 shows a frequency distribution corresponding to figure 2 of the radiation emitted from the radiation source,

30 Figure 7 is a representation corresponding to figure 4 of the interferogram intensity as a function of the optical path length difference when using the frequency distribution shown in figure 6,

Figure 8 is a partial view of a further embodiment of the interferometer system according to the invention, and

5 Figure 9 is a partial view of a further embodiment of the interferometer system according to the invention.

10 Figure 1 shows a Fizeau interferometer system 1 for measuring a surface 5 of a plane-parallel plate 3. The plate 3 is fixed in a support 4 which is displaceable relative to a reference surface 23 by means of a motor drive 6.

15 The interferometer system 1 comprises a light source 9 which emits a beam 11 of coherent light with adjustable wavelength and frequency, respectively. The light source 9 is a so-called ECDL source, i.e., a diode laser with adjustable external cavity (external cavity diode laser).

20 Such an ECDL radiation source is, for example, described in the article "Widely Tunable External Cavity Diode Lasers" by Tim Day, Michael Brownell and I-Fan Wu. Corresponding sources can be obtained from the company New Focus, Inc., 1275 Reamwood Avenue, Sunnyvale, CA 94089, USA.

25 The beam 11 emitted by the source 9 is focused by a lens 13 onto a rotating ground glass plate or diffusing plate 15 for suppressing spatial coherence of the radiation. The diffusing plate 15 rotates about an axis of rotation not shown in figure 1.

30 After having passed through the focus in the region of the diffusing plate 15, the expanding beam 11' traverses a semi-transparent mirror 17 and, after having been sufficiently expanded, is then rendered parallel by a collimator 19 which may comprise one or more lenses. The thus parallelized beam 11" passes through a glass plate 21 whose surface 23 35 facing away from the collimator 19 forms the reference surface for measuring the surface 5 of the plane-parallel plate 3. The reference

surface 23 is provided as flat as possible. A surface 25 of the plate 21 facing towards the collimator 19 extends at an angle with respect to the reference surface 23 so that radiation reflected from said surface 25 is not reflected back upon itself and does not contribute to 5 disturbing interferences.

Radiation reflected back upon itself from reference surface 23 is again collimated by the collimator 19, impinges on the semi-transparent mirror 17 and is imaged by the mirror, after having passed through an 10 aperture 27 and an ocular 29, onto a radiation-sensitive layer 31 of a CCD camera 33. A part of the beam 11 passing through the reference surface 23 impinges on the surface 5 of the plane-parallel plate 3 to be measured. The surface 5 to be measured is oriented as orthogonally as possible in respect of the direction of the parallel beam 11". A 15 portion of the radiation impinging on the surface 5 to be measured is, again, reflected back upon itself, passes again through the plate 21 and is likewise focused by the collimator 19 and imaged on the radiation-sensitive surface 31. The radiation-sensitive layer 31 of the camera 33 thus forms a screen on which the radiation reflected back 20 from the reference surface 23 interferes with the radiation reflected from the surface 5 to be measured.

It is one purpose of the interferometer arrangement 1 to detect the interference pattern generated by the interfering superposition of the 25 radiation reflected back from the reference surface 23 and the radiation reflected back from the surface 5 to be measured.

As already mentioned above, the plate 3 is, however, a plane-parallel plate, that is, the surface 5 of the plate 3 to be measured and a back 30 surface 7 of the plate 3 opposed thereto extend substantially parallel to each other. This results in that a portion of the radiation 11 passing through the surface 5 to be measured is likewise reflected back upon itself from the back surface 7 of the plate 3 and imaged on the radiation-sensitive layer 31.

Accordingly, on the one hand, the radiation reflected back from the reference surface 13 interferes on the radiation-sensitive layer 31 with the radiation reflected back from the surface 5 to be measured, an optical path length difference therebetween being  $2 \cdot C_0$ , and, on the 5 other hand, the radiation reflected from the reference surface 23 interferes on the radiation-sensitive layer 31 with the radiation reflected from the back surface 7 of the plane-parallel plate 3, an optical path length difference therebetween being  $2 \cdot C_2$ , and, furthermore, the radiation reflected from the surface 5 of the plate 3 10 to be measured interferes there with the radiation reflected from the back surface 7 thereof, an optical path length difference therebetween being  $2 \cdot C_1$ . The interference pattern generated on the radiation-sensitive layer 31 is thus very complicated and difficult to evaluate.

15 The camera 33 supplies the data which are representative of a radiation intensity distribution on the radiation-sensitive surface 31 via a data line 35 to a computer 37. The computer 37, in turn, generates a representation of the interference pattern on the radiation-sensitive layer 31 on a display 39, an interference pattern being represented 20 merely schematically in figure 1 by a plurality of fringes 40. Further, the computer 37 stores the data and also performs an evaluation of the interference pattern to determine therefrom level differences between the reference surface 23 and the surface 5, to be measured, and the topology of the surface 5 to be measured, respectively.

25 Moreover, the interferometer system 1 comprises a controller 41 which is supplied, via a control line 43, with frequency data and which is triggered by the computer 37, said controller then setting, time-dependently, via a line 45 the frequency of the radiation 11 to be 30 emitted from the source 9 in response to a trigger signal 48 generated by the camera 33 which is also supplied to the computer via a line 47.

A method for operating the interferometer system 1 is described hereinbelow, the plate 3 being assumed to have a thickness of 74 mm, so 35 that, taking the refractive index of the glass of the plate 3 into

consideration, a resulting optical path difference  $2 \cdot C_1$  of 214.39 mm is provided.

First, the controller 41 sets, via line 45, the frequency of the 5 radiation source 9 to a first frequency with a value  $f - \Delta f$  and starts, via line 47, the integration of the CCD camera 33 so that the interference pattern which is generated by the wavefronts reflected from the three surfaces 23, 5 and 7, upon illumination with radiation of the frequency  $f - \Delta f$ , impinges on the radiation-sensitive surface 31 of the camera 33, and the corresponding radiation intensity is integrated there. After 3.75 msec, the controller 41 sets the source 9 to a second, higher frequency  $f$  so that interference patterns generated at this frequency impinge during the integration time of the camera 33 as second interference patterns on the radiation-sensitive layer 31, 15 and the corresponding radiation intensities are integrated there with the intensities of the first interference pattern. After a further 7.5 msec, the controller 41 sets the frequency of the radiation source 9 to a still higher, third frequency with the value  $f + \Delta f$  so that the interference pattern generated at this third frequency likewise 20 impinges during the integration time of the camera on the light-collecting surface 31 thereof, and the intensities of the third interference pattern are added to the intensities of the first and the second interference patterns. The illumination with the third frequency  $f + \Delta f$  lasts for 3.75 sec. After that, the controller 41 causes, via line 25 47, the integration time of the camera 33 to terminate, and the data which represent position-dependently the entire light intensity which has impinged during the integration time on the light-collecting surface 31 are read-out and supplied to the computer 37 via line 35.

30 The above-described integration time of the camera of 15 msec was chosen in the present embodiment to achieve a high-quality image at the given laser power.

35 Depending on the laser energy available and other boundary conditions, it is also possible to set different integration times.

These data are thus representative of the sum of three different interference patterns, wherein the first interference pattern was recorded with radiation of the frequency  $f - \Delta f$ , wherein the second interference pattern was recorded with the frequency  $f$  and wherein the third interference pattern was recorded with the frequency  $f + \Delta f$ . When the three interference patterns are integrated, the interference pattern recorded at the medium frequency  $f$  is weighted with double the weighting factor as compared to the two other frequencies  $f - \Delta f$ ,  $f + \Delta f$ .

10 This weighted illumination with three different frequencies is again illustrated in figures 2 and 3. In figure 2, the spectral power density is shown in arbitrary units as a function of the wave number  $k$  of the radiation of the source 9. It is apparent that the illumination with the three different frequencies is effected with the relative weighting factors 0.5, 1 and 0.5. This spectral power density distribution can be represented as a formula as follows:

15

$$F(k) = A \cdot \sum_{-k_0}^{k_0} \delta(k - k_0) + \sum_{-k_0}^{k_0} \delta(k - k_0 - \Delta k) + \sum_{-k_0}^{k_0} \delta(k - k_0 + \Delta k)$$

20

Equation (1)

wherein

25  $\delta$  is Dirac's delta function

$k$  is the wave number  $2\pi/\lambda$ ,

$k_0$  is the basic wave number  $2\pi/\lambda_0$  and

$\Delta k$  is the wave number change corresponding to the frequency change  $\Delta f$ .

30 In the present case,  $\lambda_0$  was chosen to be 632.8 nm. The radiation source 9 can be set to this wavelength, and this setting is advantageous in so far as, apart from the radiation source, a structure and components which are known from interferometers operated with conventional He-Ne lasers can be used for the interferometer system.

35

The interferogram as Fourier transform of the spectral density may be written as

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} I(k) \cdot \cos kx \cdot dk = A \cdot \frac{1}{2} \left[ \cos \Delta k \frac{N_0}{2} + \cos \Delta k \frac{N_0}{2} + A \cdot \cos(k_0 x) \right]$$

$$= A \cdot \cos k_0 x \cdot \frac{N_0}{2} \cos \Delta k \frac{N_0}{2}$$

5

Equation (2)

Accordingly, a beat wave number of  $\Delta k$  results for the interferogram. A graph of the function  $I(x)$  is schematically shown in figure 4 for an 10 arbitrary point in the interferogram. An envelope of the depicted curves is also referred to as interference contrast or modulation. Accordingly, the modulation periodically increases and decreases as a function of the distance from the reference surface, wherein the modulation goes down to zero at specific distances.

15

An advantageous operation of the interferometer system 1 is provided when the reflecting surfaces 23, 5, 7 are disposed relative to one another such that the optical path difference  $2 \cdot C_1$  caused by the distance between the surface 5 to be measured and the back surface 7 20 approximately coincides with the first minimum of the modulation minimum, and such the path difference  $2 \cdot C_2$  caused by the distance between the reference surface 23 and the back surface 7 of the plate 3 approximately coincides with the second minimum of the modulation minimum, and such that the path length difference  $C_0$  produced by the 25 distance between the reference surface 23 and the surface 5 to be measured approximately coincides with the second maximum of the modulation maximum. To this end, first of all the frequency change  $\Delta f$  and wave number change  $\Delta k$ , respectively, are determined as follows:

30 First,  $1 + \cos \Delta k \cdot C_1$  is set to 0, which results in  $\Delta k \cdot C_1 = \pi$ . As, in the present example, the plate thickness  $C_1$  is assumed to be 214.139 mm, this results in  $\Delta k = 14.67 \text{ m}^{-1}$ . Then, the distance of the plate 3 from the reference surface 23 is adjusted via the drive 6 such that  $\Delta k \cdot C_2 = 3\pi$  is fulfilled. It should be noted in this respect that the last-mentioned

condition need to be observed only with relative little accuracy, since the modulation according to figure 4 exhibits quadratic minima and these are thus relatively insensitive to changes in the optical path difference.

5

With the above-illustrated setting of  $\Delta k$  and the distance of the back surface 7 from the reference surface 23, the optical path length difference  $2 \cdot C_0$  is automatically set to such a value that it approximately coincides with the second maximum of the modulation maximum according to figure 4.

Accordingly, the disturbing interferences caused by the back surface 7 of the plate 3 are thus effectively averaged out by the weighted averaging carried out during the integration time of the camera 33, so that the interferogram obtained by the averaging comprises, apart from a constant radiation portion, merely a fringe pattern as it would be generated by the interference solely of the wavefront reflected back from the reference surface 23 with the wavefront reflected back from the surface 5 to be measured. This relatively simple and undisturbed interference pattern is then subjected to a conventional evaluation method for fringe patterns in order to determine on the basis thereof the topology of the surface 5 to be measured.

The operation of the interferometer system 1 is not limited to control the frequency of the radiation source 9 with the timing scheme shown in figure 3. In the following, there is discussed as a variant the possibility to change the frequency of the radiation source 9 with a sinusoidal time dependency. First, be it assumed here for the interferogram intensity I:

30

$$I(x) = I_0 [1 + V \cdot \cos \Phi(x - \Phi_0)]$$

Equation (3)

35 wherein

k is the wave number of the radiation which can be assumed to be approximately constant in this formula,  
 x is the optical wavelength difference,  
 $\Phi_0$  is an interferogram phase and  
 5 v is an interference contrast.

Due to the sinusoidal frequency change, the interferogram phase then results into

10  $\Phi_0 = \Phi_0(t) = \Phi_0 + A \cdot \sin \omega t,$

Equation (4)

wherein

15  $\Phi_0'$  is an average phase value,  
 $\omega$  is the angular velocity of the phase modulation and  
 A is a phase modulation amplitude.

20 Inserted into equation (3), it thus follows:

$$I(x, t) = I_0 \cdot [1 + V \cdot \cos \{2\pi x - \Phi_0' - A \cdot \sin \omega t\}].$$

Equation (5)

25 The modulation period for the frequency change of the radiation is then set such that an integer numbered multiplicity thereof corresponds to the integration time of the camera 33. The time averaged interferogram is thus calculated to be

$$\begin{aligned}
 \bar{I}(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [1 + V \cdot \cos \bar{m}x - \Phi_0 - A \cdot \sin \omega t] J_0(A) d\omega \\
 &= I_0 + I_0 \cdot V \cdot \cos \bar{m}x - \Phi_0 \underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} A \sin \omega t J_0(A) d\omega}_{J_0(A)} \\
 &\quad + I_0 \cdot V \cdot \sin \bar{m}x - \Phi_0 \underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} A \sin \omega t J_0(A) d\omega}_0
 \end{aligned}$$

$$\bar{I}(x) = I_0 \cdot [1 + V \cdot \cos \bar{m}x - \Phi_0 \cdot J_0(A)]$$

Equation (6)

wherein  $J_0(A)$  is the Bessel function of zero order of the phase 5 modulation amplitude  $A$ . This function is shown in figure 5.

Phase modulation amplitudes  $A$  may then be determined such that interferences between the wavefronts reflected back from the surface 5 to be measured and from the back surface 7 of the plate 3 will 10 disappear. Accordingly, the frequency modulation amplitude of the radiation source 9 must be set such that the phase modulation for the optical wavelength difference  $2 \cdot C_1$  corresponds to the first zero point of the Bessel function of Equation (6). This is the case for  $A_1 = 0.76547 \cdot \pi$ .

15

Furthermore, by changing the distance between the reference surface 23 and the plate 3, it is achieved that the optical wavelength difference  $2 \cdot C_2$  corresponds to the second minimum of the Bessel function of Equation (6), which is the case for  $A_2 = 1.7571 \cdot \pi$ . The ratio of the 20 optical path differences is thus given by the two first zero point of the Bessel function  $J_0(A)$

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{A_2}{A_1} = 2,2955$$

Equation (7)

On the other hand,  $C_0=C_2-C_1$  is valid, and for the optical path difference  $C_0$  to be measured, the amplitude results in

5

$$A_0 = \frac{C_0}{C_1} \cdot A_1 = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot A_1 = 0,9916 \cdot \pi$$

Equation (8)

10 At this point, the Bessel function  $J_0(A)$  has the value

$$J_0(A_0) = -0,297 \approx -0,3$$

Equation (9).

15

In this arrangement, three partial beams having an approximately identical basic intensity interfere with each other. However, only the fringe patterns of two interfering partial beams are visible in the weighted averaged, respectively integrated interferogram. The other 20 interferences are averaged out, form a constant radiation portion which reduces the contrast, however. The effective contrast is calculated to be

$$V_{eff} = V \cdot J_0(A_0) = \frac{2}{3} \cdot |-0,3| = 0,2$$

25

Equation (10)

This contrast is sufficient to determine the positions of the fringes 40 and to be able to derive the topology of the surface 5 to be measured from the evaluation of the fringe pattern. However, it should be noted that the radiation frequency setting according to the scheme 30 shown in figure 3 results in a higher effective contrast.

In the following, there is described as further exemplary embodiment for a situation such that the radiation source 9 is controlled to emit a Gaussian spectral power density as shown in figure 6

$$5 \quad A(k) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma \cdot e^{-\frac{\phi(k_0) \cdot k^2}{2}},$$

Equation (11)

wherein

10

$k$  is the wave number  $2\pi/\lambda$

$k_0$  is the central wave number  $2\pi/\lambda_0$

$\sigma$  is the width of the Gaussian function.

15

For this spectral distribution a time-dependent control function for the radiation frequency is now to be determined. In this respect, the dependency

20

$$\frac{dk(t)}{dt} = \frac{1}{A[k(t)]}$$

Equation (12)

25 is to be observed. This equation may be solved numerically by the computer 37 in order to finally obtain a time scheme corresponding to figure 3 for the controlling of the radiation frequency.

With the spectral power density according to figure 6, a dependency of the interferogram intensity on the path difference results as it is shown in figure 7. It is evident therefrom that, at small distances from the reference surface 23, high interference contrasts are achievable, whereas the contrast is strongly reduced at larger distances from the reference surface 23. This reduction in contrast is so strong that, when the plate 3 is positioned closely adjacent to the

reference surface 23, interferences which are caused by the back surface 7 are largely averaged out, and merely interferences caused by the surface 5 to be measured contribute to the fringe pattern of the averaged interferogram.

5

This corresponds to an interferogram with a radiation having a frequency which is constant in time and to a reduced coherence length which is shorter than the optical thickness  $C_1$  of the plate 3. The time-dependent frequency change of a radiation source having a large coherence length thus has an effect which corresponds to a reduction of the time coherence for specific lengths. With reference to figure 4, this means that the time-dependent frequency change has caused the coherence of the radiation to be destroyed in the regions of the minima of the modulation minima.

15

Further variants of the embodiments illustrated with reference to figures 1 to 7 will be described hereinbelow. Components which correspond in their structure and function to those of figures 1 to 7 are designated by the same reference numbers, but, for the purpose of distinction, are supplemented by an additional letter. For the purpose of illustration, reference is made in each case to the entire foregoing description.

Figure 8 shows a partial view of an interferometer system 1a which is similar in construction to the interferometer system shown in figure 1. However, the interferometer system 1a serves to measure a concentric meniscus lens 3a rather than a plane-parallel plate. An aplanar collimator 51 having a plurality of lenses 52 to 56 is positioned in the beam path downstream of a reference plate 21a having a reference surface 23a, said collimator focussing the parallel radiation 11'a in a location 57 which further is a center of curvatures of the surfaces 5a and 7a of the concentric meniscus lens 3a.

Otherwise, the interferometer system 1a corresponds to the interferometer system shown in figure 1 and is operated according to a method as illustrated with reference to the interferometer system of

figure 1. That is, the frequency of the radiation source is controlled in a time-dependent manner such that disturbing interferences are largely averaged out in terms of time which disturbing interferences may be caused by a surface of the concentric meniscus lens 3a which is 5 currently not measured, in particular the surface 7a, or by other optically effective components in the beam path.

The surfaces 5a and 7a of the meniscus lens 3a can also be measured by 10 positioning the lens reversely, that is, it is positioned in the beam path with its convex surface 7a disposed towards the collimator 51 and upstream of the focus 57.

Figure 9 shows a variant of the interferometer system shown in figure 8. In contrast to that system, in the interferometer system 1b 15 according to figure 9 a reference surface 23a is not provided on a separate reference plate but on a precisely fabricated surface of the lens 56b of an aplanar collimator 51, which surface is disposed towards the object to be measured. The interferometer system 1b, too, serves to measure a concentric meniscus lens.

20 Apart from the above-described time-dependencies of the frequency of the radiation source for generating the interferogram, it is also possible to select other time-dependencies which are found to be favorable. What is decisive in this respect is that interference 25 effects which are caused by surfaces which are not to be measured are at least partially averaged out over time.

The interferometer system was described above as a Fizeau 30 interferometer. However, it is also possible to use alternative interferometer types, such as a Michelson interferometer configuration or a Twyman Green interferometer configuration.

In the above-described exemplary embodiments, the CCD camera was used 35 as integrator for the weighted averaging of the interference patterns generated at different illumination frequencies. However, it is also possible to use other camera types which have an integration time which

is adapted to the sequence of the illumination frequencies adjusted successively in time. Furthermore, it is possible to generate separate camera images for several radiation frequencies, to supply the same to the computer and to carry out the integration and weighted averaging, 5 respectively, pixel-by-pixel in the computer. The term pixel should be understood within the scope of the present application to mean a resolution unit of the digitalized interference image which is determined, among others, by the camera system. Here, the averaging effected in the computer can also be carried out for groups of pixels, 10 that is, with a resolution which is lower than the camera resolution.

The above-described interferometer system and the method for recording the interferogram is advantageously used in a method for providing an object and in a method for manufacturing an object with a predetermined 15 target surface.

If, for example, the plane-parallel plate described with reference to figure 1 is to be manufactured with high precision, it is positioned in the beam path of the interferometer system, and an interferogram is 20 recorded according to the above-described method. Deviations of the surface 5 from the flat nominal shape are determined from the interferogram. On the basis of these deviations, a reworking operation is planned. In particular, positions on the surface 5 are determined from these deviations where a reworking operation, in particular, by 25 further removal of material, is to be effected. After the reworking operation has been carried out, another interferogram is taken, if required, and further reworking operations are effected, if required. If the recorded interferogram shows that deviations between the shape of the surface 5 and the plane nominal shape are less than a predefined 30 value, the plate is provided and shipped.

This providing and manufacturing method can be applied to any other object which is to have a predetermined surface. The application to a concentric meniscus lens has already been described above. However, 35 other applications for any other objects are conceivable as well.

## Patent Claims

1. An interferometer system, comprising:

- 5 - a reference surface (23),
- a support for an object (7) providing an object surface (5),
- a radiation source (9) for emitting radiation of an adjustable frequency onto the reference surface (23) and
- 10 the object surface (5), and
- a position-sensitive radiation detector (31),

wherein the radiation source (9), the reference surface (23), the support and the radiation detector (31) are positioned such that a reference wave field reflected from the reference surface (23) and an object wave field reflected from the object surface (5) are superposed to form an interference pattern having a position-dependent intensity distribution on the radiation detector (31),

20 wherein a disturbing interference surface (7) is provided which is irradiated by the radiation source (9) together with the reference surface (23) or/and the object surface (5), and

25 wherein the interferometer system further comprises a controller (37, 41) for setting a plurality of different frequencies (f,  $f+\Delta f$ ,  $f-\Delta f$ ) of the radiation emitted from the radiation source (9), characterized by an integrator (33) for position-dependent averaging the interference patterns superposed on the radiation detector (31) at different frequencies.

30 2. The interferometer system according to claim 1, wherein the radiation detector (31) is provided by a CCD camera (33).

35 3. The interferometer system according to claim 1 or 2, wherein the integrator is formed by the radiation detector (31).

4. The interferometer system according to claim 3, wherein the controller (41, 37) adjusts a plurality, in particular, all of the different frequencies successively in time during a period of time which corresponds to an integration time of the detector (33).

5. A method for recording an interferogram, comprising:

10 illuminating a reference surface (23) and an object surface (5) with coherent radiation of a predetermined frequency,

15 superposing a reference wave field reflected from the reference surface (23) and an object wave field reflected from the object surface (5) such that an interference pattern with position-dependent radiation intensity distribution is formed on a screen (31),

20 wherein the illumination is carried out successively with a plurality of different radiation frequencies ( $f$ ,  $f+\Delta f$ ,  $f-\Delta f$ ), such that interference patterns are successively generated on the screen which each correspond to the respective different frequencies, and

25 wherein the interferogram is formed by a weighted averaging of intensities of the plurality of the interference patterns at each respective position of the interferogram.

30 6. The method according to claim 5, wherein the weighting factors for the weighted averaging are set by adjusting periods of illumination with the respective different radiation frequencies.

35 7. The method according to claim 5 or 6, wherein a disturbing interference surface (7) is positioned spaced apart from the object surface (5) by a distance or/and spaced apart from the reference surface (23) by a distance ( $C_2$ ), which disturbing interference surface is illuminated together with the object

surface (5) and the reference surface (23), respectively, and wherein values of the different radiation frequencies or/and weighting factors for the weighted averaging are adjusted as a function of the distance.

5

8. The method according to one of claims 5 to 7, wherein there is a first optical path difference ( $C_0$ ) between an optical path from the reference surface (23) to the detector (31) and an optical path from the object surface (5) to the detector (31),  
 10 wherein there is a second optical path difference ( $C_2$ ) between an optical path from the reference surface (23) to the detector (31) and an optical path from the disturbing interference surface (7) to the detector (31),  
 wherein there is a third difference ( $C_1$ ) between the first and the  
 15 second optical path differences,  
 wherein the illumination is effected with three different radiation frequencies, namely a medium frequency (f), a higher frequency ( $f+\Delta f$ ) and a lower frequency ( $f-\Delta f$ ), the three frequencies having a pair-wise frequency distance ( $\Delta f$ ) which is  
 20 adjusted such that the equation

$$\Delta k \cdot C_1 = \pi$$

25 is fulfilled, wherein  $\Delta k$  is the wave number change corresponding to the frequency distance ( $\Delta f$ ),  
 wherein the distance between the disturbing frequency surface and the detector is adjusted such that the equation

$$\Delta k \cdot C_2 = 3\pi$$

30

is fulfilled, and wherein the weighting is effected such that the interference pattern corresponding to the lower frequency and the interference pattern corresponding to the higher frequency are associated with a single weighting factor and the interference pattern corresponding to the medium frequency is associated with a double weighting factor.

9. A method of providing an object (3) having a target surface, comprising the steps of:

- recording an interferogram using the method according to one of claims 5 to 8, wherein the object (3) provides the object surface (5);
- evaluating the interferogram and determining deviations between the object surface and the target surface as a function of the interferogram;
- providing the object if the deviations are smaller than a predetermined threshold value; and
- not providing the object if the deviations are higher than a predetermined threshold value.

15 10. A method of manufacturing an object with a target surface, comprising the steps of:

- recording an interferogram using the method according to one of claims 5 to 8, wherein the object provides the object surface (5);
- evaluating the interferogram and determining deviations between the object surface and the target surface as a function of the interferogram; and
- removing surface portions from the object at positions which are determined as a function of the deviations between the object surface and the target surface to adapt the object surface of the body to the target surface.

11. The method of claim 9 or 10, wherein the body to be manufactured is a transparent plane-parallel plate or a concentric meniscus lens.

**Abstract**

An interferometer system is provided comprising a reference surface, a support for an object providing an object surface, a radiation source for emitting radiation of an adjustable frequency onto the reference surface and the object surface, and a position-sensitive radiation detector, and furthermore a controller for adjusting a plurality of different frequencies of the radiation emitted by the radiation source, and an integrator for averaging the interference patterns superposed on the radiation detector at different frequencies.

Moreover, a method is provided for recording an interferogram, a method for providing an object with a target surface as well as a method for manufacturing an object with a target surface.